12.19

Spektrum der Wissenschaft

www.Spektrum.de 12.19

Die Vermessung des Nichts

Physiker lösen die letzten Rätsel des Quantenvakuums



8,90 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



FRÜHMENSCHEN Zahnanalysen enthüllen die wahre Steinzeitdiät

RAUMFAHRT Raketenantriebe der Zukunft

TIEFSEEBERGBAU Manganknollen und schwarze Raucher



EDITORIAL
BLICK IN DIE FERNE

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Ich habe mich an dieser Stelle schon einige Male als Sciencefiction-Fan geoutet. Ein besonderes Faible habe ich dabei für Autoren wie Arthur C. Clarke, Hal Clement oder Robert Heinlein. In jener »klassischen« Ära des Genres standen oft auch künftige technische Entwicklungen im Fokus der Erzählung, etwa zur Raumfahrt. Entsprechend interessiert habe ich den Artikel ab S. 74 über futuristische Raketenantriebe gelesen. Denn mit den herkömmlichen Methoden, die alle auf mitgeführte Treibstoffe angewiesen sind, werden wir nur schwer das äußere Sonnensystem erkunden können, geschweige denn darüber hinaus in den interstellaren Raum gelangen.

Natürlich kann man fragen, warum wir dieses Ziel überhaupt verfolgen sollten. Müssten die Menschen nicht eher alle Kräfte darauf bündeln, die vielen aktuellen Probleme auf der Erde lösen, statt den Blick in ferne Weiten schweifen zu lassen? Der Gedanke wirkt erst einmal überzeugend. Aber dann fällt mir dazu ein weiterer SF-Klassiker ein: »Das Ende der Ewigkeit« von Issac Asimov. Hier greift eine Zeitreise-Organisation immer wieder in bester Absicht minimalinvasiv in die Abläufe der Geschichte ein, um Katastrophen abzuwenden und Risiken zu mindern. Das führt jedoch dazu, dass die Menschen die durchaus riskante interstellare Raumfahrt erst angehen, als es zu spät ist, weil andere intelligente Lebensformen inzwischen die gesamte Galaxie besiedelt haben. Die Menschheit, eingesperrt auf dem Planeten Erde, stirbt nicht wegen Ressourcenknappheit oder Nuklearkriegen aus, sondern auf Grund kollektiver Depression wegen fehlender Zukunftsperspektiven. Vielleicht müssten wir also ab und zu über den näheren und mittleren zeitlichen Horizont hinwegblicken und uns fragen, wohin unsere Reise langfristig gehen soll.

Andere Visionäre richten ihren Fokus statt nach oben ins Weltall nach unten in die Tiefsee. Seit einigen Jahren konkretisieren sich die Planungen zum Abbau wertvoller Rohstoffe wie Manganknollen oder Sulfiderzen im Umfeld heißer Quellen. Das würde Metalle liefern, die etwa für zukünftige Elektroautos benötigt werden. In unserem Interview beschreiben Carsten Rühlemann und Ulrich Schwarz-Schampera von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ab S. 52 den aktuellen Stand der Dinge. Unklar ist bis heute, wie sich der Tiefseebergbau auf die dortigen Ökosysteme auswirkt und ob die bislang vorgesehenen Schutzgebiete ausreichen. Hier gibt es also noch einige Forschungsarbeit zu leisten, damit wir sicherstellen können, dass die betroffenen Biotope keine irreparablen Schäden davontragen. Auch bei diesem Thema ist Weitsicht angesagt!

Eine erhellende Lektüre wünscht

Hartwig Hanser



NEU AM KIOSK!

In unserem **Spektrum** SPEZIAL Biologie – Medizin – Hirnforschung 4.19 steht der Mensch im Mittelpunkt: Was macht *Homo sapiens* so einzigartig?

IN DIESER AUSGABE



PETER S. UNGAR

Dass es keine einheitliche »Steinzeitdiät« gab, erklärt ab S. 34 der Anthropologe von der University of Arkansas.



MENNO SCHILTHUIZEN

Auf einem Spaziergang durch seine Heimatstadt Leiden entdeckte der Biologe viele Beispiele dafür, wie sich Pflanzen und Tiere an ein Leben in urbaner Umgebung anpassen (S. 42).




ABHAY DESHPANDE UND RIKUTARO YOSHIDA

Die Physiker untersuchen Elementarteilchen bei höchsten Energien. Ab S. 64 erläutern sie, wie sie Atomkernen die letzten Geheimnisse entlocken wollen.

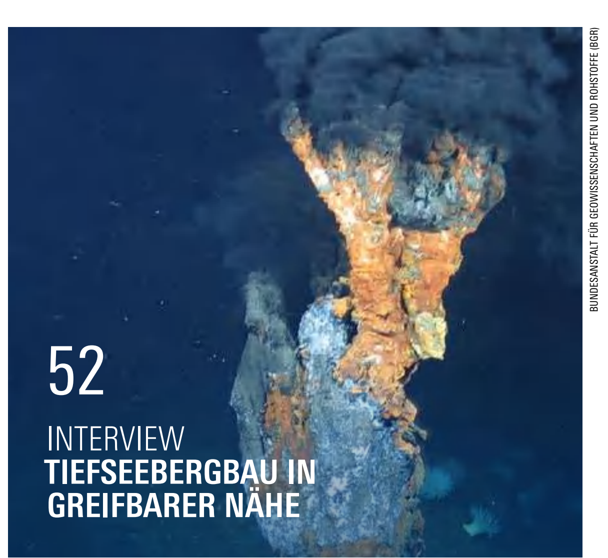
INHALT

TITELBILD:
SAKKMESTERKE / GETTY IMAGES / ISTOCK;
HINTERGRUND: ALTAYB / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SAKKMESTERKE / GETTY IMAGES / ISTOCK



JON FOSTER / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018



BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR)





FLOTO+WARNER

MARTIN KUPPE FÜR SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

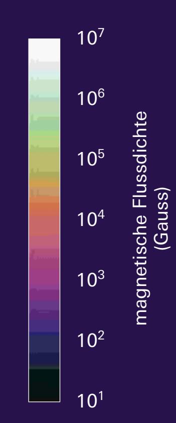
Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

ENTSTEHUNG EINES MAGNETSTERNS

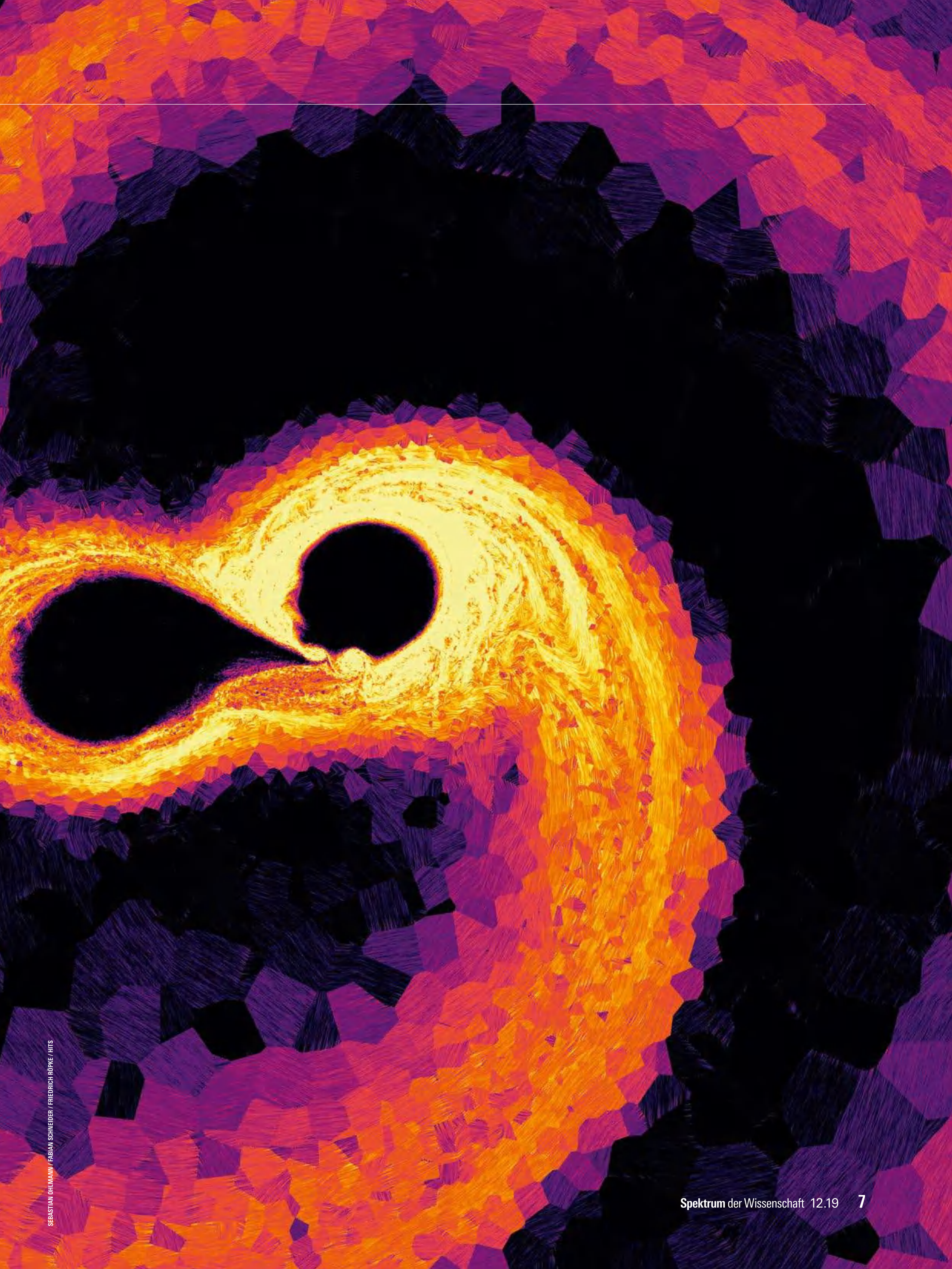
Manche Sterne sind von ungewöhnlich starken Magnetfeldern umgeben, etwa Tau Scorpii im Sternbild Skorpion. Ein Team um Fabian Schneider vom Heidelberger Institut für Theoretische Studien hat nun mit einer aufwändigen Computersimulation nachvollzogen, wie der Riesenstern durch den Zusammenstoß zweier leichterer Sonnen entstanden ist. Demnach umkreisten sich die beiden Himmelskörper zunächst auf immer engeren Bahnen, was Materie wild durchs All schleuderte. Kurz vor der Verschmelzung strömte dann mehr und mehr Gas von einem Stern zum anderen und sammelte sich dort in einer Akkretionsscheibe. In ihr können turbulente Ladungsströme Magnetfelder enorm verstärken.

Wenn Tau Scorpii in ferner Zukunft in einer Supernova explodiert, bleibt vermutlich ein besonders stark magnetisierter Neutronenstern zurück, vermuten die Forscher. Bisher zählt es zu den offenen Fragen der Astrophysik, wie diese »Magnetare« entstehen können.

Nature 10.1038/s41586-019-1621-5, 2019



SEBASTIAN OHLMANN / FABIAN SCHNEIDER / FRIEDRICH RÖPKE / HITS



SEBASTIAN OHLMANN / FABIAN SCHNEIDER / FRIEDRICH RÖPKE / HITS

SPEKTROGRAMM

BIOLOGIE
LANDGENE VON MEERESSÄUGERN

Die Vorfahren von Walen und Delfinen lebten an Land – und zogen erst vor rund 50 Millionen Jahren ins Wasser um. Um die Herausforderungen im Meer zu meistern, mussten sich die Tiere stark verändern. Sie verloren Haare und Beine und entwickelten die Fähigkeit, Sauerstoff lange im Körper zu speichern. Forscher gehen davon aus, dass dies mit gravierenden genetischen Anpassungen einherging. An welchen Stellen sich das Erbgut verändert hat, ist allerdings nach wie vor unklar.

Ein Team um Matthias Huelsmann vom Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik hat nun in 19769 Genen von 62 heutigen Säugetierarten – darunter Wale, Delfine, Robben, Seekühe sowie viele an Land lebende Arten – nach Mutationen gesucht, die ein Gen abgeschaltet haben. Dabei stießen die Wissenschaftler auf 85 Varianten, die bei allen untersuchten Wal- und Delfinarten vorkommen, nicht aber im Familienstamm der Flusspferde, von dem sich die Meeressäuger vor ihrer Abwanderung in die Ozeane abspalteten.



Für das Leben im Wasser benötigten Wale und Delfine viele Gene nicht mehr, weshalb sich ihr Erbgut veränderte.

CARL BUELL, COURTESY OF JOHN GATESY, AMNH

Vermutlich handelt es sich um Veränderungen, mit denen die Tiere vor rund 50 Millionen Jahren auf ihre neue Lebensumgebung reagiert haben. Die Mutationen betreffen unterschiedliche Bereiche des Erbguts: So haben Meeressäuger unter anderem für ein Gen, das an der Speichelproduktion beteiligt ist, keine Verwendung mehr. Zudem wandelte sich ihr Erbgut in einer Weise, die sie vor Blutgerinnseln und Lungenschäden schützt. Auch haben Wale und Delfine all jene Gene inaktiv geschaltet, die zur Produktion von Melatonin nötig sind. Es ist ein wichtiges Hormon für der Regulation des Schlafs im Tag-Nacht-Zyklus. Wale und Delfine schlafen aber ganz anders: Bei ihnen wechseln sich die beiden Hirnhälften mit dem Ausruhen ab.

Science Advances 10.1126/sciadv.aaw6671, 2019

PHYSIK
AXION ALS QUASITEILCHEN

Das Axion ist eine der großen Hoffnungen der Teilchenphysik: Das extrem leichte Elementarteilchen könnte der Stoff sein, aus dem die rätselhafte Dunkle Materie besteht. Forscher konnten bisher allerdings nicht nachweisen, dass Axionen in der Natur wirklich existieren (siehe **Spektrum** März 2019, S. 12).

Nun hat ein Team um Johannes Gooth vom Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe immerhin ein »Quasiteilchen« mit den Eigenschaften eines Axions aufgespürt. Quasiteilchen sind Mehr-Teilchen-Zustände in Festkörpern, die sich mathematisch wie ein einzelnes Teilchen beschreiben lassen. Ein bekanntes Beispiel ist das Phonon, das für die wellenartige Bewegung von Atomen in einem Festkörper steht.

Das nun entdeckte Axion-Quasiteilchen tritt in einem so genannten Weyl-Halbmetall auf, in dem sich Elektronen zu Weyl-Fermionen zusammenfinden. Bei ihnen handelt es sich ebenfalls um Quasiteilchen, die sich ausschließlich parallel zu ihrem Spin bewegen können. Die Forscher um Gooth kühlten ein Weyl-Halbmetall namens $(TaSe_4)_2I$ auf minus 11 Grad Celsius ab, wodurch sich die Fermionen in einer Art Ladungswelle ansammelten. In Tests konnte das Team zeigen, dass die Phase dieses Zustands genau so auf magnetische Felder reagiert, wie es Axionen gemäß den Gesetzen der Teilchenphysik in freier Natur tun sollten.

Dunkle-Materie-Jäger bringt das leider kaum weiter: Physiker haben in Festkörpern schon öfter Quasiteilchen nachgewiesen, deren Elementarteilchen-Variante heiß gesucht ist. Vor einigen Jahren gelang dies beispielsweise mit so genannten Majorana-Fermionen – einer anderen großen Hoffnung der Teilchenphysik, die sich bisher nicht realisiert hat.

Nature 10.1038/s41586-019-1630-4, 2019

MEDIZIN
DIAGNOSE PER KÜNSTLICHER INTELLIGENZ

Stellt künstliche Intelligenz genauso gute Diagnosen wie Ärzte? Meldungen dieser Art häufen sich in den vergangenen Jahren. In den USA hat die für das Gesundheitssystem zuständige Behörde sogar schon mehr 30 KI-Algorithmen zugelassen. Jetzt hat ein Team um Alastair Denniston vom University Hospital Birmingham systematisch alle bisher erschienenen Studien in einer großen Metaanalyse ausgewertet. Tiefe neuronale Netze erkennen demnach Krankheiten wie Krebs tatsächlich so zuverlässig wie Fachleute. Allerdings ließen nur wenige Studien gesicherte Aussagen zu, da viele davon gegen grundlegende Qualitätskriterien guter wissenschaftlicher Praxis verstießen.

Die Forschenden sammelten zunächst alle Untersuchungen zwischen 2012 und Juni 2019, die zur Fragestellung passten. Sie fanden mehr als 20000, aber lediglich 69 lieferten genug Daten, um die Trefferquoten zu berechnen. Von diesen hatten bloß 25 ihre neuronalen Netze extern validiert, sie also an Fällen getestet, die nicht zuvor dem Training der KI dienten. Und nur 14 davon verglichen die Leistung des Deep-Learning-Modells mit denen der Ärzte an denselben Fällen.

Am häufigsten ging es darum, Augenerkrankungen zu erkennen, daneben stand unter anderem die Diagnose von Brust-, Lungen- und Hautkrebs sowie Herz- und Magen-Darm-Erkrankungen im Mittelpunkt. Die Basis bildeten beispielsweise Röntgen- und CT-Aufnahmen oder Bilder des Augenhintergrunds. In den 14 genauer betrachteten Studien identifizierten KI-Modelle 87 Prozent der Kranken und 93 Prozent der Gesunden, medizinische Fachleute schlugen sich mit 86 Prozent beziehungsweise 91 Prozent ähnlich gut. Soweit ersichtlich, sei KI also weder besser noch schlechter darin, medizinische Aufnahmen auszuwerten, so das Team. Es brauche aber mehr aussagekräftige Studien, bis man sich auf die diagnostische Kompetenz von Deep Learning wirklich verlassen könne.

The Lancet Digital Health 10.1016/S2589-7500(19)30123-2, 2019

MATHEMATIK
WIE MAN DEN BESTEN PARKPLATZ FINDET

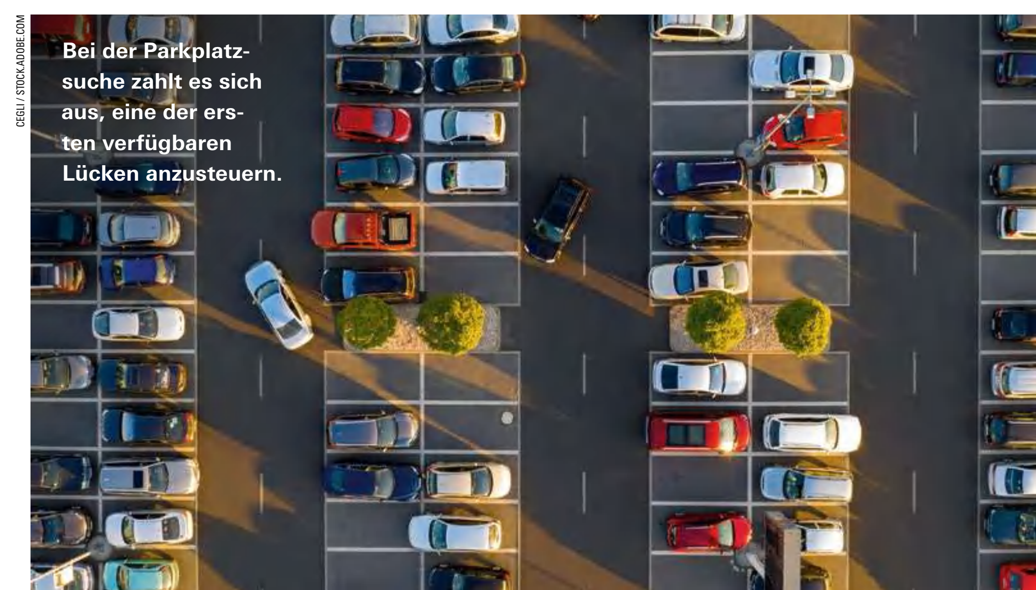
Wer mit seinem Auto auf einen großen Parkplatz fährt, muss eine Abwägung treffen: Sollte man möglichst nah an den Eingang des angesteuerten Gebäudes heranfahren, in der Hoffnung, irgendwo eine gerade frei gewordene Lücke zu ergattern? Oder lieber auf Nummer sicher gehen und bewusst auf dem ersten verfügbaren Platz parken – auch wenn man von dort aus noch ein ganzes Stück laufen muss?

Paul Krapivsky von der Boston University und Sidney Redner vom Santa Fe Institute haben sich der Frage nun mit einem Computermodell genähert. Die Experten für statistische Physik untersuchten damit die leicht vereinfachte Situation, in der Autos nacheinander einen Parkplatz in einer langen, auf das Ziel zulaufenden Reihe finden müssen. Dabei folgten die simulierten Autos einer von drei Strategien: Ein Teil entschied sich gleich für den ersten Parkplatz neben dem am weitesten vom Ziel geparkten Auto. Die zweite Gruppe fuhr so nah wie möglich ans Ziel heran, machte kehrt und suchte von dort aus den besten Parkplatz. Der Rest wählte stets die erste Lücke aus, die sie zwischen zwei geparkten Autos entdeckten, ging also pragmatisch vor.

Der Simulation zufolge brachte diese Strategie im Durchschnitt den größten Zeitgewinn. Die pragmatische Gruppe schlug sich aber nur leicht besser als die optimistische Vorgehensweise der Lauffaulen, die den bestmöglichen Parkplatz suchten. Am meisten Zeit benötigten hingegen Fahrer, die ihr Auto möglichst weit abseits abstellten: Sie fanden zwar sofort einen Halteort, verloren dann jedoch Zeit durch den langen Fußweg.

Das galt allerdings nur für die Fälle, in denen viele Fahrer dieser Strategie folgten und in denen viele Autos unterwegs waren. In einer Welt mit wenigen Pkws und vielen eifrigen Parkplatzjägern schneiden Fahrer, die keine Lust auf eine langwierige Suche haben, vermutlich etwas besser ab, so die Forscher. Immerhin tut die Gruppe wegen des längeren Fußwegs ihrer Gesundheit einen Gefallen – und womöglich auch ihrer Psyche.

Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment 10.1088/1742-5468/ab3a2a, 2019



Bei der Parkplatzsuche zahlt es sich aus, eine der ersten verfügbaren Lücken anzusteuern.

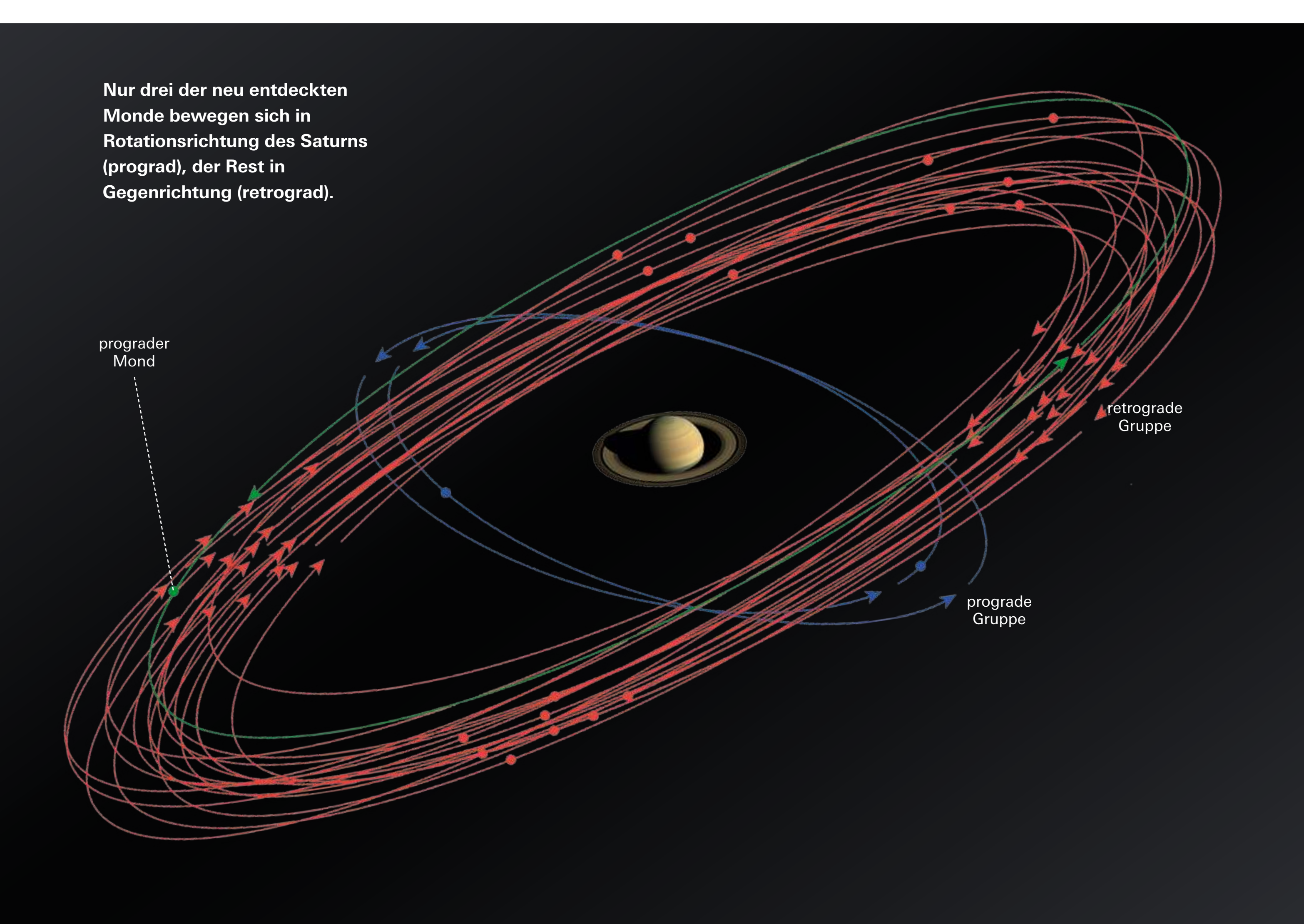
ASTRONOMIE
NEUE SATURNMONDE

Bisher waren die Kompetenzen bei den Gasplaneten klar verteilt: Während der kleinere Saturn als Herr der Ringe glänzt, war Jupiter der König der Monde. Nach aktuellem Kenntnisstand hat Letzterer 79 natürliche Trabanten, Saturn kam bisher auf lediglich 62 (siehe **Spektrum** September 2018, S. 11). Doch nun hat eine Arbeitsgruppe um Scott S. Sheppard von der Carnegie Institution for Science in Washington D. C. mit dem Subaru-Teleskop auf Hawaii 20 neue Saturnmonde entdeckt. Die Himmelskörper sind jeweils rund fünf Kilometer groß. Drei von ihnen bewegen sich in der Richtung, in der Saturn um seine eigene Achse rotiert (prograd), 17 in Gegenrichtung (retrograd). Letztere benötigen jeweils etwa drei Jahre für eine Umrundung des Gasplaneten, die beiden näheren der prograden Dreiergruppe brauchen nur zwei.

Die Bahnen dieses Duos sind um etwa 46 Grad gegen die Rotationsebene des Saturns gekippt (siehe Bild). Sie gehören damit zur so genannten Inuit-Gruppe, die wahrscheinlich bei einer Kollision größerer Monde in Saturns Kindertagen entstanden ist. Auch die 17 retrograd wandernden Himmelskörper haben einen solchen Ursprung, vermuten die Forscher.

Um Jupiter gibt es ebenfalls entsprechende Gruppen von Monden. Das deutet darauf hin, dass Saturns Titel als neuer König der Monde keineswegs gesichert ist. Erst 2018 entdeckten Sheppard und sein Team die bislang letzten zwölf Jupitermonde. Noch ist unklar, ob die Liste damit wirklich vollständig ist.

Pressemitteilung der Carnegie Institution, Oktober 2019



Nur drei der neu entdeckten Monde bewegen sich in Rotationsrichtung des Saturns (prograd), der Rest in Gegenrichtung (retrograd).

ILLUSTRATION: CARNEGIE INSTITUTION FOR SCIENCE; SATURN: NASA/JPL-CALTECH/SPACE SCIENCE INSTITUTE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ARCHÄOLOGIE
SOZIALSTRUKTUR IN DER BRONZEZEIT



Ein in Kleinaitingen geborgenes Bronzezeitskelett wurde mit reichen Grabbeigaben bestattet.

ARBEITSKREIS FÜR VOR- UND FRÜHGESCHICHTE IM HEIMATVEREIN FÜR DEN LANDKREIS AUGSBURG E.V., GRUPPE SÜD

Vor vier Jahrtausenden bildeten offenbar reiche Bauernfamilien den Mittelpunkt der Gesellschaft, die ihren Besitz stets an die männlichen Nachkommen vererbten. Sie waren von einer Schar aus schlechter gestellten Arbeitskräften umgeben, die mit ihnen auf demselben Hof lebten – und auch dort bestattet wurden, allerdings ohne die bei Familienmitgliedern üblichen Grabbeigaben.

Das und mehr folgern Archäologen und Genetiker um Alissa Mittnik vom Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte aus der Erforschung von 118 Toten aus Gräberfeldern im Lechtal südlich von Augsburg. Die ältesten Funde sind ungefähr 4500 Jahre alt, die jüngsten etwa 3800 Jahre. In diesem Zeitfenster war das Lechtal wegen seiner fruchtbaren Böden dicht besiedelt, Gehöfte zogen sich wie Perlen an einer Schnur am Rand einer kleinen Anhöhe entlang.

Sowohl die Frauen als auch die Männer der herrschenden Familien waren damals sehr mobil, wie Analysen von Knochen, Zähnen und Gendaten zeigen. Junge Männer scheinen damals eine Art Gesellenwanderung unternommen zu haben, nach der sie wieder an ihren Heimatort zurückkehrten. Ihre Bräute hingegen kamen oft von weither, beispielsweise aus dem heutigen Sachsen-Anhalt.

Die in den »Armengräbern« bestatteten Menschen haben das Lechtal hingegen nie verlassen. Ob es sich bei ihnen um unfreie Sklaven oder eher Knechte und Mägde handelte, ist unklar. Bislang haben sich Wissenschaftler den Aufbau der bronzezeitlichen Gesellschaft anders vorgestellt. Im klassischen Bild steht ein kleines, aber mächtiges Herrschergeschlecht einer Schar von einfachen Bauern gegenüber.

Stattdessen scheint die grundlegende Organisationsform das bäuerliche Gehöft gewesen zu sein, in dem es große soziale Ungleichheit gab, so die Forscher. Eine Gesellschaftsstruktur, die nicht ohne historische Parallelen ist: Ganz ähnlich waren die »familia« und »oikos« bei den antiken Römern und Griechen aufgebaut.

Science 10.1126/science.aax6219, 2019

CHEMIE
BAKTERIUM ZERSTÖRT UMWELTCHEMIKALIEN

Ein Bodenbakterium ist in der Lage, Fluoratome von einer extrem langlebigen und vermutlich gesundheitsschädlichen Klasse von Molekülen abzuspalten. Wie Shan Huang und Peter R. Jaffé von der Princeton University berichten, baut ein Stamm der Gattung *Acidimicrobium* binnen 100 Tagen Perfluoroctansäure (PFOA) und Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) zu 60 Prozent ab.

PFOA und PFOS gehören zu einer Gruppe von Industriechemikalien, in denen Wasserstoffatome durch Fluor ersetzt wurden. Diese Veränderung gibt den Stoffen neue Eigenschaften. Davon profitieren zum Beispiel Antihaftbeschichtungen von Bratpfannen; es macht sie aber wegen der sehr stabilen Bindung von Fluor mit Kohlenstoff extrem schwer abbaubar. Gleichzeitig gelangen immer mehr solcher Stoffe in die Umwelt und reichern sich in der Nahrungskette an.

Fachleute sehen Indizien dafür, dass die Substanzen bei höheren Konzentrationen gesundheitsschädlich sind. Die Europäische Kommission hat den Gebrauch von PFOS deshalb bereits 2006 stark beschränkt, von 2020 an soll die Herstellung von PFOS und PFOA weltweit verboten werden. Für Spezialanwendungen wird es vermutlich eine Übergangsfrist von fünf Jahren geben.

Da die Stoffe jedoch nach wie vor über Gebrauchsgegenstände in die Umwelt gelangen, sind Strategien zur Entfernung gefragt. Huang und Jaffé suchten deshalb einen Organismus, der diese stabile Atombindung knacken kann. Bei der Gattung *Acidimicrobium* wurden sie fündig: Das Bakterium gewinnt Energie, indem es mit Ammonium als Elektronenquelle Eisen reduziert.

In Gegenwart fluorierter Substanzen fließt ein Teil der Elektronen in die Produktion von Fluorid, einem harmlosen anorganischen Salz. Da der Eisen-Ammonium-Stoffwechsel weit verbreitet ist und abläuft, sobald ein Boden sauer und eisenreich ist, sehen die Forscher in ihrer Entdeckung eine gute Chance, fluorierte Chemikalien aus der Umwelt zu entfernen.

Environmental Science and Technology 10.1021/acs.est.9b04047, 2019

QUANTENELEKTRODYNAMIK
DIE VERMESSUNG DES NICHTS

Diverse Quantenfelder durchdringen das Vakuum. Auf äußere elektromagnetische Felder reagieren sie empfindlich: Das Vakuum verhält sich dann plötzlich wie ein optisches Medium.

SAKKMESTERKE / GETTY IMAGES / ISTOCK

Lange war man überzeugt, das Vakuum beschreibe einen leeren Raum. Doch die Quantenphysik belehrt uns eines Besseren: Es ist erfüllt von Quantenfeldern, die zu seltsamen Phänomenen führen. In den nächsten Jahren wollen Forscher in einer Reihe von Experimenten nach und nach seine letzten Geheimnisse enthüllen.



Thomas Heinzl ist Associate Professor für theoretische Physik an der University of Plymouth in Großbritannien.

spektrum.de/artikel/1681126

Seit der Antike diskutieren Wissenschaftler über die Natur des Vakuums. Im 5. Jahrhundert v. Chr. vertraten die Gelehrten Leukipp und Demokrit die Meinung, dass sich zwischen den winzigen Bausteinen der Materie bloß leerer Raum befinde. Diese Ansicht fand jedoch nicht bei allen Anklang, zum Beispiel widersprach Aristoteles seinen Kollegen. Daraufhin setzte sich die Vorstellung durch, die Natur hege eine Art Abneigung gegen einen leeren Raum (horror vacui).

Die Unstimmigkeiten zogen sich bis in die Moderne hinein. Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte der englische Experimentator Michael Faraday die Idee von magnetischen Feldern, die den leeren Raum erfüllen. James Clerk Maxwell, der wenig später die klassische Theorie des Elektromagnetismus formulierte, wollte sich Felder hingegen nicht ohne materiellen Träger vorstellen: Er postulierte die Existenz eines Äthers, der den Raum durchziehen und elektromagnetische Wellen transportieren sollte.

Die letzten Zweifel an einem materiefreien Raum räumte erst Albert Einstein mit der speziellen Relativitätstheorie aus. Gäbe es einen Äther, würde man abhängig davon, in welche Richtung man sich durch ihn bewegt, eine unterschiedliche Lichtgeschwindigkeit verzeichnen. Doch verschiedene Experimente ergaben, dass sich Licht immer gleich schnell ausbreitet – ob man sich auf eine Lichtquelle zu- oder von ihr wegbewegt, spielt dabei keine Rolle. Ab diesem Zeitpunkt war klar: Anders als Schall benötigen elektromagnetische Wellen keinen materiellen Träger.

Somit lagen Leukipp und Demokrit vor etwa 2500 Jahren näher an der Wahrheit als die Verfechter der Ätherhypothese. Die heute wohl geläufigste Vorstellung des Vakuums ist ein völlig leerer Raum – was allerdings nur stimmt, solange man die allgegenwärtigen Felder vernachlässigen kann. Sobald man aber genauer hinsieht, machen diese sich bemerkbar. In äußeren elektromagnetischen Feldern verhält sich das Vakuum beispielsweise wie ein polarisierbares Medium, das unter anderem Licht bricht. Sind die angelegten Felder stark genug, könnten sogar Teilchen aus dem Nichts entstehen!

Seit einigen Jahrzehnten sammeln Physiker experimentelle Hinweise auf die ungewöhnliche Natur des Vakuums. Doch selbst die am stärksten ausgeprägten Effekte sind vergleichsweise klein und bewegen sich im Promillebereich, so dass die Forscher präzise Detektoren benötigen. Viele weitere vorhergesagte Phänomene, etwa die Streuung von Licht an Licht, treten noch seltener auf. Dank fortschreitender Lasertechnik könnten Wissenschaftler auch solchen Prozessen bald auf die Spur kommen. Damit wären sie in der Lage, ihre physikalischen Theorien noch genauer auf den Prüfstand zu stellen.

Als Maxwell die Elektrodynamik entwickelte, vereinheitlichte er elektrische und magnetische Phänomene, die, wie Einstein später zeigte, nicht getrennt existieren können. Ein Höhepunkt von Maxwells Werk ist die Vorhersage eines elektromagnetischen Felds, das schwingt und dabei Energie und Impuls transportiert. Als er feststellte, dass sich diese Wellen mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, wurde ihm klar, dass auch Licht eine elektromagnetische Welle ist.

Aus mathematischer Sicht ist ein Feld nichts anderes als eine Zuordnung: Jedem Punkt in der Raumzeit weist man Zahlen zu, die physikalische Größen darstellen. Ein Beispiel dafür ist eine Landkarte, auf der Färbungen unterschiedlichen Höhenlagen entsprechen. Man kann Raum- und Zeitpunkten aber auch Richtungen zuordnen, das ist etwa bei Wetterkarten mit eingezeichneten Windrichtungen der Fall. In der Elektrodynamik gehört dagegen zu jedem Raumpunkt die Richtung und die Stärke eines elektromagnetischen Feldes.

In Maxwells Theorie unterscheiden sich Wellen, die durch eine Feldtheorie beschrieben werden, grundlegend

AUF EINEN BLICK
VAKUUM: ALLES ANDERE ALS LEER

1. Auch wenn es keinen Äther gibt, ist das Vakuum nicht leer: Es steckt voller Quantenfelder, die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen erzeugen.

2. Dadurch verhält sich das Vakuum in äußeren elektromagnetischen Feldern wie ein optisches Medium. Sind die Felder besonders stark, könnten sogar Teilchen aus dem Nichts entstehen.

3. In den letzten Jahren entwickelten Forscher verschiedenste Ideen, um diese Effekte im Labor nachzuweisen. Mit fortschreitender Technik rücken die Experimente nun in greifbare Nähe.

von Materie. Dennoch stellte er fest, dass Ladungen elektromagnetische Wellen erzeugen, wenn man sie beschleunigt. Die moderne Physik revolutionierte dieses Bild, indem sie Materie ebenfalls durch Quantenfelder beschreibt. Dadurch können nicht nur Wellen durch Materie entstehen, sondern der Vorgang kann auch umgekehrt ablaufen.

Die ersten Hinweise auf eine solche Theorie fanden Physiker in Licht: Anfang des 20. Jahrhunderts postulierte Max Planck, dass elektromagnetische Strahlung nur in winzigen Energiepäckchen auftritt. Kurze Zeit später konnte Albert Einstein damit erklären, dass ein mit Licht bestrahlter Festkörper einen Stromfluss erzeugt: Die kleinen Energiepäckchen – Photonen – schlagen Elektronen aus dem Material heraus, wodurch ein Strom entsteht. Für diesen so genannten Photoeffekt, der die Grundlage heutiger Solarzellen liefert, erhielt er 1922 den Nobelpreis.

Die Grenzen zwischen Teilchen und Wellen verschwimmen

Damit war klar, dass Licht nicht nur wellenartige Eigenschaften besitzt, sondern sich manchmal wie eine Ansammlung von Teilchen verhält. Als Forscher in den 1920er Jahren die Quantenmechanik entwickelten, übertrugen sie diesen Welle-Teilchen-Dualismus auf Materie. Wie unter anderem Clinton Davisson und George Thomson in einem Experiment nachwiesen, für das sie 1937 den Nobelpreis bekamen, können Elektronen miteinander interferieren, was man sonst nur von Wellen kennt.

Um das mathematisch zu erklären, brauchten Physiker eine Feldtheorie, die nicht nur elektromagnetische Strahlung, sondern auch Materie zuverlässig beschreibt. Zudem muss eine solche Theorie quantisiert sein, da man nur so von einem Wellen- zum Teilchenbild gelangt. Forscher verbanden die Quantenmechanik mit der speziellen Relativitätstheorie, um eine derartige »Quantenfeldtheorie« zu entwickeln.

Dadurch ergab sich ein völlig neues Bild unserer Welt. In ihm ist die Raumzeit von lauter unterschiedlichen, schwingenden Quantenfeldern durchzogen. Ähnlich wie bei dem Ton einer Gitarre lassen sich ihre Vibrationen in Grundschwingungen zerlegen, denen man Energie und Impuls zuweisen kann. Deshalb identifizieren Physiker die Grundschwingungen mit Elementarteilchen, etwa einem Elektron oder einem Photon. Aus theoretischer Sicht sind Quantenfelder daher die fundamentalen Objekte, aus denen Strahlung, Materie und deren Wechselwirkungen entspringen, die man im Labor detektiert.

Bis auf die Schwerkraft lassen sich alle Grundkräfte durch Quantenfeldtheorien ausdrücken. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelang es Physikern sogar, die quantisierte Version der Elektrodynamik, die Quantenelektrodynamik, mit der schwachen und der starken Kernkraft zum so genannten Standardmodell der Teilchenphysik zu vereinen. Dieses beschreibt bis heute zuverlässig subatomare Teilchen und ihre Wechselwirkungen untereinander.

In dieser neuen Vorstellung gibt es keinen leeren Raum, da alles von Quantenfeldern durchdrungen ist. Daher brauchten Physiker eine neue Definition des Vakuums. Inzwischen bezeichnen sie damit den Zustand, in dem die Felder die niedrigste Energie besitzen. Doch die Quantenfelder sind dabei keineswegs regungslos, sondern unterliegen Schwankungen – so genannten Fluktuationen. Der Grund dafür ist eine weitere Eigenheit der Quantenmechanik: Überlagerungen.

Wie Wissenschaftler feststellten, können sich mikroskopische Objekte in mehreren Zuständen gleichzeitig befinden. Das ist mit unserer alltäglichen Intuition nur schwer vereinbar, was der berühmte Physiker Erwin Schrödinger durch sein berühmtes Gedankenexperiment verdeutlichte. Darin beschrieb er eine Katze, die sich zusammen mit einem instabilen Atomkern und einer Giftphiole in einer Kiste befindet. Sobald der radioaktive Kern zerfällt, führt ein Mechanismus dazu, dass die Phiole zerbricht und das Gift freigesetzt wird. Quantenmechanisch gesehen befindet sich der Atomkern in einem überlagerten Zustand aus »zerfallen« und »nicht zerfallen«, wodurch die Katze als Summe beider Möglichkeiten sowohl tot als auch lebendig ist. Erst wenn man die Kiste öffnet und nachsieht, entscheidet sich, ob das Tier noch lebt oder nicht. Bisher konnte niemand Überlagerungen bei einem makroskopischen Objekt wie einer Katze nachweisen, doch Forschern gelang es in den letzten Jahren, das Gedankenexperiment mit immer größeren Molekülen nachzustellen, wodurch sie die Grenzen der Quantenwelt ständig weiter verschieben (siehe **Spektrum** August 2018, S. 12).

Licht ist eine elektromagnetische Welle, deren magnetischer (blau) und elektrischer (rot) Anteil in Raum und Zeit schwingen. Die Richtung, in die das elektrische Feld deutet, heißt Polarisation einer Welle.

Quantenfluktuationen und virtuelle Teilchen

Im Gegensatz zu realen Teilchen existieren ihre virtuellen Versionen nur als Möglichkeit. Dennoch sind sie in überlagerten Zuständen allgegenwärtig und gehen in quantenmechanische Berechnungen ein. Daher sind sie ein theoretisches Konstrukt, das aber beobachtbare Auswirkungen hat. Ein Beispiel dafür ist die so genannte Vakuumpolarisation, bei der Photonen in virtuelle Elektron-Positron-Paare fluktuieren. Letztere besitzen keine Teilcheneigenschaften wie Masse oder Energie, weshalb man sie nicht in Detektoren nachweisen kann. Deshalb ist es häufig besser, sie nicht als Teilchen anzusehen, sondern als mathematischen Beitrag, der die messbaren Eigenschaften des Photons geringfügig korrigiert.

Überlagerungen sind auch in der Quantenfeldtheorie allgegenwärtig. Jedes Teilchen tritt dabei stets als Kombination aller möglichen Zustände auf, die mit seinen physikalischen Eigenschaften vereinbar sind. Ein Elektron ist dann nicht nur ein Elektron, sondern eine Summe aus diesem und anderen Partikeln. Die Möglichkeiten sind meist unbegrenzt, so dass ein Teilchen als Überlagerung unendlich vieler Zustände erscheint, die seine Quantenzahlen nicht ändern, also unter anderem die gleiche elektrische Ladung oder einen identischen Spin haben.

Die zusätzlichen Beiträge zum eigentlichen Teilchen entstehen durch Fluktuationen im Quantenfeld. Diese Schwankungen ähneln selbst Partikeln, allerdings können sie sich im Gegensatz zu realen Teilchen nicht frei bewegen, wodurch es unmöglich ist, sie direkt zu detektieren. Physiker bezeichnen sie deshalb als »virtuell« (siehe »Quantenfluktuationen und virtuelle Teilchen«, oben).

Doch selbst wenn man sie nicht unmittelbar nachweisen kann, hinterlassen virtuelle Teilchen messbare Spuren. Ihre Beiträge gehen in quantentheoretische Berechnungen ein, die das Ergebnis häufig maßgeblich beeinflussen. Viele Prozesse können sogar nur dann stattfinden, wenn virtuelle Teilchen beteiligt sind, weil die Wahrscheinlichkeit für solche Vorgänge sonst null wäre. Ein Beispiel dafür ist die Streuung von Licht an Licht, was die klassische Elektrodynamik verbietet.

Quantenfluktuationen beeinflussen aber nicht nur Teilchen, sondern auch das Vakuum, das ebenfalls überlagert auftaucht. Insgesamt entspricht der Zustand niedrigster Energie also nicht einem materiefreien Raum, sondern ist die Summe unendlich vieler verschiedener Mehrteilchen-Zustände:

Quantenvakuum = leeres Vakuum + virtuelles Teilchen-Antiteilchen-Paar + (virtuelles Teilchen-Antiteilchen-Paar + virtuelles Photon) + … + (viele virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare + viele virtuelle Photonen) + …

Das Quantenvakuum ist dadurch weder leer noch statisch, sondern fluktuiert innerhalb der Summe aller Möglichkeiten in Form virtueller Teilchen. Am bedeutendsten sind dabei – wegen ihrer geringen Masse – virtuelle Elektron-Positron-Paare, die insgesamt keine elektrische Ladung besitzen. Physiker bezeichnen ihre Wirkung als Vakuumpolarisation, weil sie dazu führt, dass sich das Vakuum wie ein dielektrisches Material verhält: In einem äußeren elektrischen Feld richten sich die virtuellen Paare wie Dipole entlang der Feldlinien aus.

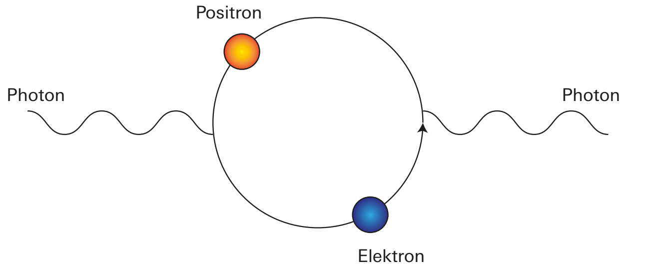
Einfluss virtueller Teilchen

Forscher untersuchen seit Jahrzehnten, wie Quantenfluktuationen reale Teilchen und physikalische Prozesse beeinflussen. Und tatsächlich erzielten sie dabei beeindruckende Erfolge: Ihre Ergebnisse sind so präzise, dass die Quantenelektrodynamik inzwischen die am genausten überprüfte wissenschaftliche Theorie ist. In einigen Fällen decken sich die Berechnungen bis zur zehnten Nachkommastelle mit den Messungen. Dennoch gibt es Vorhersagen, die Physiker noch nicht testen konnten, weil ihnen die technischen Möglichkeiten fehlten. Das soll sich in den kommenden Jahren ändern.

Eine wesentliche Folge der Vakuumpolarisation ist die so genannte Ladungsrenormierung. Befindet sich ein einzelnes Elektron im Vakuum, richten sich die virtuellen Paare so aus, dass sie seine Ladung abschirmen. Kommt man dem »nackten« Elektron näher und dringt dabei in die Wolke aus virtuellen Teilchen ein, wächst seine Ladung mit abnehmendem Abstand an. Da die renormierte Ladung den Einfluss der virtuellen Fluktuationen misst, liefern sie bei kleinsten Abständen den dominanten Beitrag. Dieser lässt sich nicht länger berechnen, weil man dann alle – das heißt unendlich viele – Fluktuationen gleicher Größe berücksichtigen muss. Die Quantenelektrodynamik verliert somit ihre Vorhersagekraft.

Auf extrem kleinen Längenskalen braucht man also eine neue, bisher unbekannte Theorie. Doch Physiker sind noch weit davon entfernt, die Quantenelektrodynamik in solchen Bereichen zu untersuchen. Um die Ladung eines Elektrons in einer Entfernung von einem Attometer (10^{-18} Meter) zu bestimmen, braucht man bereits milliardenteure, hochener-

Ein Photon kann spontan in ein virtuelles Elektron-Positron-Paar zerfallen, das sich kurz darauf wieder vernichtet und zum ursprünglichen Photon wird.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

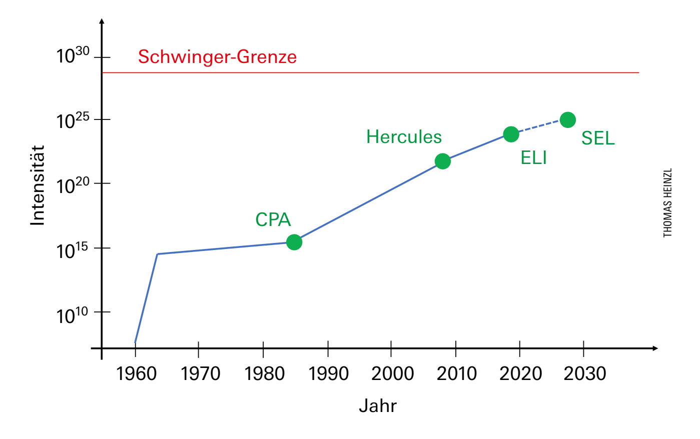
getische Teilchenbeschleuniger. Bei solchen Distanzen stimmen die Messwerte aber noch sehr gut mit der Theorie überein: Die Ladung erhöht sich bloß um etwa sieben Prozent verglichen mit ihrem Wert bei großen Abständen, was aufwändige Streuexperimente bestätigen.

Es gibt noch weitere Bereiche der Quantenelektrodynamik, zu denen Forscher bisher nicht vordringen konnten. Dabei handelt es sich um Situationen mit extrem starken elektromagnetischen Feldern. In solchen Fällen treten nichtlineare Effekte auf: Ein Verdoppeln der angelegten Feldstärke führt zu einer mehr als doppelt so starken Reaktion des Vakuums. Berechnungen zufolge können dann ungewöhnliche Phänomene auftauchen. Plötzlich werden Prozesse möglich, die ohne äußeres Feld verboten sind, deren quantenmechanische Wahrscheinlichkeit also gleich null ist.

In einem starken äußeren Feld kann ein Elektron beispielsweise ein reales Photon aussenden. Normalerweise ist das nicht möglich, weil es die Energie- und Impulserhaltung verletzt. Indem das Elektron aber mit dem äußeren Feld wechselwirkt, kann es diese Einschränkungen umgehen. Die Energie und Ausbreitungsrichtung des ausgestrahlten Photons hängen von der Intensität des Lasers ab – und zwar auf nichtlineare Weise. Dieses Phänomen ließ sich erstmals in den 1990er Jahren am Stanford Linear Accelerator (SLAC) beobachten. Derzeit planen Wissenschaftler neue Versuche dazu, unter anderem am DESY-Beschleunigerzentrum in Hamburg (LUXE-Experiment), um genau zu bestimmen, wie stark der Effekt von der Laserintensität abhängt.

Eine weitere theoretische Vorhersage der 1950er Jahre fasziniert bis heute viele Forscher: Teilchen können demnach direkt durch ein elektromagnetisches Feld erzeugt werden, ohne dass Elektronen oder andere Materie daran beteiligt sind (siehe »Teilchen aus dem Nichts«, S. 18). Anschaulich gesehen würde das Vakuum dabei so stark polarisiert, dass die Teilchen-Antiteilchen-Paare auseinanderreißen und zu realen Partikeln werden, weil sie sich nicht mehr gegenseitig vernichten können. Bei diesem nach dem Physik-Nobelpreisträger Julian Schwinger benannten Effekt würden Teilchen also sozusagen aus dem Nichts entstehen. Wie sich herausstellt, braucht man dafür allerdings elektrische Felder mit einer Intensität von 10^{29} Watt pro Quadratzentimeter – wovon man noch weit entfernt ist.

Dank der Entwicklung der »Chirped Pulse Amplification« (CPA) konnte die Laserintensität in den 1980er Jahren drastisch gesteigert werden. Aktuell geplante Laser nähern sich der Schwinger-Grenze.



Gechirpte Laserpulse

Zwischen den 1960er und den 1980er Jahren waren die Fortschritte bei der Leistungssteigerung von Lasern gering. Zwar konnte man ihre Intensität (Photonendichte) erhöhen, indem man die Pulse durch spezielle Verstärkerzellen führte, wodurch die Photonenzahl anwuchs. Doch sobald man mehr als 10^{15} Watt pro Quadratzentimeter erreichen wollte, gingen die Zellen kaputt.

Durch einen Trick, den der französische Physiker Gérard Mourou und seine damalige kanadische Doktorandin Donna Strickland von der Radartechnik übernahmen, gelang es ihnen, die Intensitäten von Lasern drastisch zu steigern. Dafür wurden sie 2018 mit dem Nobelpreis für Physik belohnt. Ihre Idee besteht darin, die Pulse in die Länge zu ziehen, so dass die Verstärkerzellen geringeren Intensitäten ausgesetzt sind. Außerhalb des optischen Systems kann man die Pulse wieder zusammenziehen, wodurch extrem hohe Intensitäten entstehen.

Mit dieser Chirped Pulse Amplification (CPA) genannten Technik erreichen heutige Laser inzwischen bis zu 10^{22} Watt pro Quadratzentimeter. Künftige Geräte wie ELI in Prag und Bukarest sowie SEL in Schanghai sollen diese Intensitäten noch übertreffen und bisher unerforschte Bereiche des Quantenvakuums beleuchten.

Die stärksten Felder entstehen durch Laserpulse, die elektromagnetische Strahlung auf engstem Raum in möglichst kleine Pakete bündeln. Momentan ist HERCULES an der University of Michigan das leistungsfähigste Modell, das immerhin beeindruckende 10^{22} Watt pro Quadratzentimeter schafft. Viele Forschungsgruppen entwickeln derzeit neue Hochleistungslaser, die sich der so genannten Schwinger-Grenze von 10^{29} Watt pro Quadratzentimeter nähern sollen (siehe »Gechirpte Laserpulse«, oben). Doch selbst der leistungsfähigste unter ihnen, der an der Station of Extreme Light in Schanghai gebaut wird, wird höchstens 10^{25} Watt pro Quadratzentimeter erreichen und wäre damit noch vier Größenordnungen vom Ziel entfernt. Erschwerend kommt hinzu, dass ein einzelner Laser für den Schwinger-Effekt nicht ausreicht. Der speziellen Relativitätstheorie zufolge muss man mindestens zwei Wellen überlagern, um Teilchen zu erzeugen.

Dennoch hoffen einige Forscher, das ungewöhnliche Phänomen in den nächsten Jahren beobachten zu können. Denn sie gehen davon aus, dass der Übergang zur Schwin-

ger-Grenze fließend verläuft. Demnach könnte man auch in schwächeren Feldern Paare erzeugen, wenn man Photonen mit genügend hohen Energien verwendet, etwa Gammaquanten. Physiker am LUXE-Experiment wollen dafür Elektronen stark beschleunigen, damit sie die hochenergetischen Photonen ausstrahlen.

Aber selbst wenn man die für die Paarerzeugung nötigen Energien oder Intensitäten nicht erreicht, könnten andere spannende Prozesse stattfinden, etwa die Streuung von Licht an Licht. Werner Heisenberg und sein damaliger Doktorand Hans Euler sagten die Möglichkeit dafür bereits in den 1930er Jahren voraus. Auf direktem Weg können Photonen nicht miteinander wechselwirken – sie ziehen unbeeinflusst aneinander vorbei. Doch die Vakuumpolarisation macht es möglich, dass sie entgegen den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik aufeinander einwirken. Saust ein Photon auf ein anderes zu, kann es mit geringer Wahrscheinlichkeit die virtuellen Elektron-Positron-Paare in diesem »spüren«. Licht lässt sich also durch Licht ablenken – damit scheinen Lichtschwerter in greifbarer Nähe!

Hoffnung für Star-Wars-Fans?

Bevor Star-Wars-Fans allerdings in Jubel ausbrechen, muss man herausfinden, wie häufig ein solches Phänomen eintritt. Leider streuen Photonen extrem selten aneinander. Die Wahrscheinlichkeit dafür hängt von der Energie der Lichtteilchen ab. Verwendet man beispielsweise statt sichtbarem Licht hochenergetische Gammastrahlen – erhöht die Energie also um etwa eine Million – nimmt die Wahrscheinlichkeit für eine Streuung um eine Trillion Trillionen (10^{36}) zu. Aber selbst dann ist die Chance für ein solches Ereignis noch immer winzig, weshalb es Forschern bis heute nicht gelang, den Prozess im Labor nachzuweisen.

2017 halfen sich Wissenschaftler am größten Teilchenbeschleuniger der Welt, dem Large Hadron Collider am CERN, jedoch mit einem Trick: Statt realen Photonen nutzten sie ihre virtuellen Versionen. Dazu schossen sie schwere, positiv geladene Bleikerne aufeinander. Einige der Kerne flogen nah aneinander vorbei, ohne zusammenzustoßen. Dabei entstanden kurzzeitig extrem starke elektromagnetische Felder, wodurch die Bleikerne sehr viele virtuelle Photonen austauschten. Unter enormem Aufwand gelang es den Forschern, 13 Streuvorgänge zwischen jeweils zwei virtuellen und zwei realen Lichtteilchen aus einer Gesamtzahl von vier Milliarden anderen Prozessen herauszufiltern – was verdeutlicht, wie selten Licht selbst unter den besten Voraussetzungen mit Licht wechselwirkt.

Nun bemühen sich Forscher darum, die Streuung von rein realen Photonen zu beobachten. 2017 gab es zwar erste Hinweise auf das Phänomen in der Nähe von Neutronensternen, wo extrem starke magnetische Felder den Effekt begünstigen, doch ein eindeutiger Beleg fehlt noch.

Um die Wahrscheinlichkeit für reale Photon-Photon-Streuung möglichst groß zu gestalten, muss man drei Punkte beachten. Einerseits braucht man hochenergetische Strahlen, die sich sehr gut kontrollieren lassen. Zudem sollten die Strahlungsquellen möglichst viele Photonen erzeugen, damit überhaupt eine Streuung stattfindet. Und zuletzt müssen die Messapparate extrem empfindlich sein, um einzelne Ereignisse unter Millionen anderer herauszufiltern. Diese technischen Hürden haben einem experimentellen Nachweis bisher im Weg gestanden.

2006 entwickelte ein Forscherteam, dem ich angehörte, eine Idee für einen Versuch, der das Phänomen mit heute verfügbaren Mitteln registrieren könnte. Dazu nutzen wir aus, dass aneinander streuende Lichtteilchen nicht nur ihre Flugbahn ändern, sondern manchmal auch die Richtung wechseln, in der sie schwingen – ihre so genannte Polarisation (siehe Bild, S. 14). In starken elektrischen Feldern erwarten wir, dass das Vakuum die Polarisation



Einige Materialien – wie der hier gezeigte Kalkspat – sind doppelbrechend. Einfallendes Licht wird darin in zwei Lichtstrahlen geteilt, weshalb dadurch betrachtete Objekte doppelt erscheinen.

THOMAS HEINZL



Der European X-Ray Free-Electron Laser (XFEL) bei Hamburg erzeugt hochintensive Laserstrahlen.

EUROPEAN XFEL / JAN HOSAN

einer Welle derart beeinflusst, wie es sonst optische Medien tun.

Das Vakuum würde dann doppelbrechend, eine Eigenschaft, die manche Festkörper innehaben. Ein Beispiel dafür ist ein transparenter Kristall aus Kalzit (Kalkspat, siehe Bild auf S. 17), der eine optische Vorzugsrichtung besitzt, die so genannte optische Achse. Einfallendes Licht, das senkrecht zu dieser Achse polarisiert ist, verlangsamt sich im Kristall um einen Faktor $n_1 = 1{,}66$, während dieser für den parallelen Anteil nur $n_2 = 1{,}49$ beträgt. Wie sich Licht im Kalzitkristall ausbreitet, hängt von der Polarisationsrichtung ab. Die senkrechten und parallelen Beiträge bezüglich der optischen Achse spalten sich daher in zwei Strahlen auf, die räumlich etwas versetzt sind. Betrachtet man ein Objekt durch Kalkspat, erscheint es somit doppelt.

Die Doppelbrechung entsteht, weil Photonen an den Materieteilchen des Kristalls streuen. Dabei kann die Polarisation eines gestreuten Lichtquants um 90 Grad kippen. Die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Prozess, also das Verhältnis zwischen Photonen mit »geflippter« und ursprünglicher Polarisation, ist proportional zur quadrierten Differenz der zwei Brechungsindizes eines doppelbrechenden Mediums.

Auf diese Weise lässt sich auch die Doppelbrechung des Vakuums untersuchen. Sendet man einen Laserstrahl in ein von starken Feldern polarisiertes Vakuum, übernehmen die virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Paare die Funktion der Materieteilchen im Kristall. Die Richtung des äußeren elektrischen Feldes spielt dabei die Rolle der optischen Achse. Es ergeben sich zwei Brechungsindizes, die proportional zur Intensität des Lasers sind. Damit ein Photon seine Polarisation ändert, muss es mit einem Lichtteilchen des anregenden Felds wechselwirken. Daher ist die Photon-Photon-Streuung für die Doppelbrechung des Quantenvakuums verantwortlich. Es wirkt, als ob ein Lichtstrahl den anderen aus seiner Polarisationsrichtung »kickt«.

Wenn man nachweisen kann, dass Polarisationsflips stattfinden, hat man damit also gleichzeitig gezeigt, dass reales Licht mit sich selbst wechselwirkt. Darauf basiert unsere Idee. Wir schlugen einen experimentellen Aufbau mit zwei leistungsfähigen Lasern vor, die aufeinander gerichtet sind: einen »Abfragelaser«, der Lichtpulse aussendet, und einen »Anregungslaser«. Falls ein Photon aus dem Abfragelaser mit einem Lichtteilchen des Anregungslasers

Teilchen aus dem Nichts

Anders als die klassische Physik legt die Quantenfeldtheorie nicht fest, wie viele Teilchen ein System enthält. Das ist eine Folge der speziellen Relativitätstheorie verbunden mit der heisenbergschen Unschärferelation, die besagt, dass man einige Messgrößen nicht beliebig genau bestimmen kann. Je genauer man beispielsweise herausfinden möchte, wo sich ein Teilchen befindet, desto ungenauer wird die Messung seines Impulses. Weiß man genau, wo ein Teilchen ist, »strotzt« es also nur so von Quantenenergie. Übersteigt diese den Wert von $E = mc^2$, wobei c der Lichtgeschwindigkeit entspricht, können reale Teilchen mit der entsprechenden Masse m entstehen. Dank des quantenmechanischen Tunneleffekts können selbst unterhalb dieser Energieschwelle in einem äußeren elektrischen Feld reale Paare entstehen. Denn dadurch besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein virtuelles Paar durch die verbleibende Energielücke tunnelt und als reales Paar auftaucht. Das ist der berühmte Schwinger-Effekt.

wechselwirkt, besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit dafür, dass es seine Polarisation ändert. Dadurch spaltet sich der Abfragestrahl in zwei Bündel mit jeweils unterschiedlicher Polarisation auf, wie in einem doppelbrechenden Medium. Ein gestreutes Photon befindet sich dann im überlagerten Zustand der ursprünglichen und geflippten Polarisation, was man mit einem Polarisationsfilter nachweisen kann. Auch wenn der Aufbau des Versuchs vergleichsweise einfach klingt, birgt er wegen der niedrigen Streuwahrscheinlichkeit dennoch anspruchsvolle technische Herausforderungen.

Künftiges Experiment

Um eine Photon-Photon-Streuung auch wirklich nachzuweisen, müssen die drei zuvor genannten Bedingungen erfüllt sein. Ein Freier-Elektron-Laser, der Pulse im Röntgenspektrum ausstrahlt, gewährleistet eine hohe Energie der Abfragephotonen. Ein solches Gerät existiert seit 2017 am European X-Ray Free-Electron Laser (XFEL) bei Hamburg. Dieser hat den weiteren Vorteil, dass er hohe Intensitäten erzeugt, das heißt extrem viele einfallende Photonen aussendet, was eine Streuung wahrscheinlicher macht.

Als Anregungsquelle bietet sich ein optischer Hochleistungslaser an. Solche Geräte besitzen dank der technischen Fortschritte der letzten Jahre inzwischen Leistungen von etwa einem Petawatt (10^{15} Watt). Damit erreichen sie Photonendichten von rund einer Trillion (10^{18}) Teilchen pro Kubikmikrometer. Das Zusammenspiel von intensivem Röntgenlaser und Hochleistungslaser sollte zu Brechungsindizes des Vakuums führen, die von eins abweichen – allerdings nur um maximal 10^{-10}.

Ein solcher Versuch wäre daher sinnlos, wenn die Wissenschaftler nicht über ein präzises Messgerät verfügten. Inzwischen können hoch entwickelte Detektoren sogar unter zehn Milliarden Röntgenphotonen ein einzelnes mit geflippter Polarisation aufspüren. Die Anzahl solcher Lichtquanten mit veränderter Polarisation wird maximal, wenn man die Polarisation des Abfragelasers unter einem Einfallswinkel von 45 Grad auf das elektrische Feld des Anregungslasers treffen lässt.

Unseren Berechnungen zufolge sollte pro abgegebenem Laserpuls (»Schuss«) etwa ein geflipptes Photon auftreten. Um dieses – und damit die Vakuum-Doppelbrechung – eindeutig nachzuweisen, muss man das Experiment möglichst oft wiederholen. Sollte das tatsächlich gelingen, wäre erstmals bewiesen, dass reales Licht mit sich selbst wechselwirkt. Das zugehörige Experiment wird derzeit im HIBEF-Labor am DESY aufgebaut. Mit ersten Ergebnissen, nach Abschluss der Probeläufe, ist in den nächsten vier bis fünf Jahren zu rechnen.

Im Prinzip könnte man durch ein derartiges Experiment auch die Erzeugung von realen Elektron-Positron-Paaren beobachten. Das würde sich dadurch äußern, dass das Quantenvakuum den Abfragestrahl abschwächt – es würde wie ein absorbierendes Medium wirken. Wegen des Schwinger-Effekts zerfallen die Photonen im elektrischen Feld nämlich in Materie-Antimaterie-Paare, wodurch die Zahl der Lichtquanten abnimmt. Die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Prozess liegt aber noch weit unterhalb der Nachweisgrenze. Wir sind in jedem Fall schon sehr gespannt auf die Messergebnisse der aktuell geplanten Experimente, die wir mit den Vorhersagen der Quantenelektrodynamik vergleichen werden. Falls sich hier unerwarteterweise Unstimmigkeiten ergeben sollten, würde das auf neuartige physikalische Theorien hindeuten. ◂

Erfolge der QED

In den letzten Jahrzehnten haben Physiker mehrere Experimente entwickelt, um die Vorhersagen der Quantenelektrodynamik zu überprüfen, insbesondere die Auswirkungen virtueller Fluktuationen. Ein Beispiel dafür ist die »Lamb-Verschiebung«, wonach sich die Energieniveaus im Wasserstoffatom weiter aufspalten, als es die reine Quantenmechanik vorhersagt.

Der Grund dafür ist, dass ein Elektron nahe dem Kern ein starkes elektrisches Feld verspürt, wodurch virtuelle Photonen entstehen, die das Teilchen absorbiert und wieder aussendet. Diese Photonen fluktuieren zudem in virtuelle Elektron-Positron-Paare, welche die Energie des Elektrons zusätzlich beeinflussen. Beide Effekte führen zu einer Aufspaltung der Energieniveaus, die Willis Lamb und Robert Rutherford bereits 1947 im Labor beobachteten.

Virtuelle Fluktuationen beeinflussen auch das magnetische Moment des Elektrons, das sich ab der dritten Nachkommastelle von dem Wert unterscheidet, den die reine Quantenmechanik vorhersagt. Inzwischen stimmen die Experimente zu diesen und ähnlichen Phänomenen bis zur zehnten Nachkommastelle mit den theoretischen Korrekturen überein. Die Quantenelektrodynamik gilt deshalb als die am besten überprüfte wissenschaftliche Theorie.

QUELLEN

Atlas Collaboration: Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC. Nature Physics 13, 2017

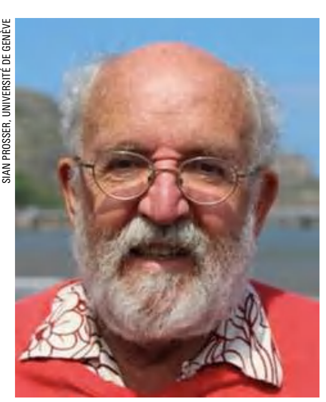
Heinzl, T. et al.: On the observation of vacuum birefringence. Optics Communication 267, 2006

King, B., Heinzl, T.: Measuring vacuum polarization with high power lasers. High Power Laser Science and Engineering 4, 2016

Mignani, R.P. et al.: Evidence for vacuum birefringence from the first optical-polarimetry measurement of the isolated neutron star RX J1856.5–3754. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 465, 2017

Schlenvoigt, H.-P. et al.: Detecting vacuum birefringence with X-ray free electron lasers and high-power optical lasers: a feasibility study. Physica Scripta 91, 2016


DENISE APPLEWHITE, OFFICE OF COMMUNICATIONS, PRINCETON UNIVERSITY


SIAN PROSSER, UNIVERSITÉ DE GENÈVE


DIDIER QUELOZ, UNIVERSITÉ DE GENÈVE

James Peebles (* 1935, links) erhält eine Hälfte des Nobelpreises für »theoretische Entdeckungen in der physikalischen Kosmologie«. Die andere Hälfte teilen sich Michel Mayor (* 1942, Mitte) und Didier Queloz (* 1966, rechts) für »die Entdeckung eines Exoplaneten im Orbit eines sonnenähnlichen Sterns«.

NOBELPREIS FÜR PHYSIK
ARCHITEKTEN UNSERES WELTBILDS

James Peebles, Michel Mayor und Didier Queloz haben sich zu ihrer Zeit randständige Forschungsfelder ausgesucht – und damit unseren Blick auf das Universum nachhaltig verändert.

Will man eine kurze Geschichte des Universums erzählen, geht sie in etwa so: Vor 13,8 Milliarden Jahren, direkt nach dem Urknall, expandierte das sengend heiße Weltall rasend schnell, und irgendwann verklumpte die auseinanderstrebende Materie hier und da. Mit der Zeit bildeten sich Galaxien, Sterne und an etlichen Orten auch Planeten. Auf mindestens einem von ihnen blicken heute Lebewesen in den Nachthimmel – und lernen dabei immer mehr über den Kosmos da draußen.

Zwei der wichtigsten Erkenntnisse des 20. Jahrhunderts prämiert die Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften nun mit dem Physik-Nobelpreis. Zu einer Hälfte geht er an den Kanadier James Peebles, der wie kaum ein anderer Theoretiker dazu beigetragen hat, die Geschichte des Weltalls zu rekonstruieren. Die andere teilen sich die Schweizer Michel Mayor und Didier Queloz. Sie erbrachten 1995 den ersten zweifelsfreien Nachweis, dass sich auch im Orbit anderer Sonnen Planeten gebildet haben.

Die Preisträger eint, dass ihre jeweiligen Forschungsgebiete zunächst eher belächelt wurden. Noch zu Beginn der 1990er Jahre hielten viele Astronomen die Suche nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems für Zeitverschwendung, da man solche Welten trotz intensiver Bemühungen noch nicht gefunden hatte. Erst als Mayor und Queloz 1995 die Entdeckung eines Gasplaneten im Sternsystem 51 Pegasi bekannt gaben, rückten viele ihrer Kollegen von dieser Haltung ab. Heute sind mehr als 4000 »extrasolare« Planeten bekannt. Hochrechnungen zufolge gibt es allein in unserer Galaxie hunderte Milliarden von ihnen.

Einen eher speziellen Ruf hatte auch die Kosmologie, als sich James Peebles Anfang der 1960er Jahre dem Feld zuwandte. Zwar konnten Theoretiker damals auf Basis von Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie über das Universum als Ganzes sinnieren. Aber da es zu dieser Zeit kaum aussagekräftige Messdaten gab, hatte die Sache etwas von Kaffeesatzleserei.

Kosmologen stritten damals heftig über die Frage, wie das Weltall entstanden ist. Ein Teil der Experten glaubte an ein statisches Universum, das es schon immer gegeben hat. Andere Forscher befürworteten die Urknall-Hypothese. Ihr zufolge steht am Anfang von Raum und Zeit eine Singularität, also ein Zustand unendlich großer Dichte, der plötzlich rasant expandierte und so unser heutiges Universum erschuf. Bereits Ende der 1940er Jahre dachten einige Physiker über ein mögliches Relikt des Urknalls nach. Zwar hätte Strahlung aus der expandierenden Urknall-Materie zunächst nicht entkommen können. Aber nach Hunderttausenden von Jahren wäre die Ursuppe aus Teilchen und Strahlung so weit abgekühlt gewesen, dass sich Atomkerne und Elektronen zu neutralen Atomen vereinen konnten. Diese »Rekombination« müsste den Kosmos auf einen Schlag durchsichtig gemacht haben, spekulierten die Forscher. Strahlung aus dem Urknall hätte sich dadurch plötzlich im ganzen Weltall ausbreiten können.

Der Schatz in der Hintergrundstrahlung

1964 fingen die Astronomen Arnold Penzias und Robert Wilson in New Jersey tatsächlich solch ein Nachglimmen auf, wofür sie bereits 1978 den Nobelpreis erhielten. Das Licht dieses »kosmischen Mikrowellenhintergrunds« ist durch die Expansion des Alls so weit gestreckt worden, dass seine Wellenlänge heute in den Bereich fällt, den die gleichnamigen Küchengeräte nutzen. Penzias und Wilson konnten die Strahlung mit einer großen Funkantenne nachweisen, hielten sie jedoch zunächst für ein

NOBEL-PREISE 2019



irdisches Störsignal. Erst ein Anruf bei Peebles' Doktorvater Robert Dicke (1916–1997) von der Princeton University brachte Aufklärung. Dicke und sein Team arbeiteten zu dieser Zeit intensiv an der Theorie der Hintergrundstrahlung. Sie wussten daher gleich, was Penzias und Wilson entdeckt hatten. Ein Teil der Anerkennung wurde auch dem damals 30-jährigen Peebles zuteil. Er hatte kurz zuvor bereits konkrete Eigenschaften der Hintergrundstrahlung vorausgesagt und sie mit kosmologischen Modellen verknüpft. Das zeigte anderen Astrophysikern, dass man in der Kosmologie mit konkreten Messwerten operieren kann, es sich also um eine quantifizierbare Wissenschaft handelt.

Fünf Jahre später war Peebles maßgeblich daran beteiligt, den eigentlichen Schatz des Urknall-Nachglimmens zu heben: Bei genauer Betrachtung der Modelle sollte die extrem schwache Strahlung, die von jedem Punkt des Himmels auf die Erde fällt, nicht exakt gleichmäßig sein, vermuteten Theoretiker. Je nach Blickrichtung müssten sich winzige Schwankungen ergeben; Physiker sprechen von Anisotropien. Den experimentellen Nachweis dafür sollte erst der COBE-Satellit in den 1990er Jahren erbringen. Bis dahin hatten Kosmologen – einer von ihnen Peebles – schon exakt ausgearbeitet, was man aus den Anisotropien lernen kann: In ihnen liegt nicht weniger als die Verteilung der Materie im Universum 380000 Jahre nach dem Urknall verborgen, zu dem Zeitpunkt, als die Elektronen zu den Atomkernen fanden und sich Strahlung erstmals ungestört ausbreiten konnte.

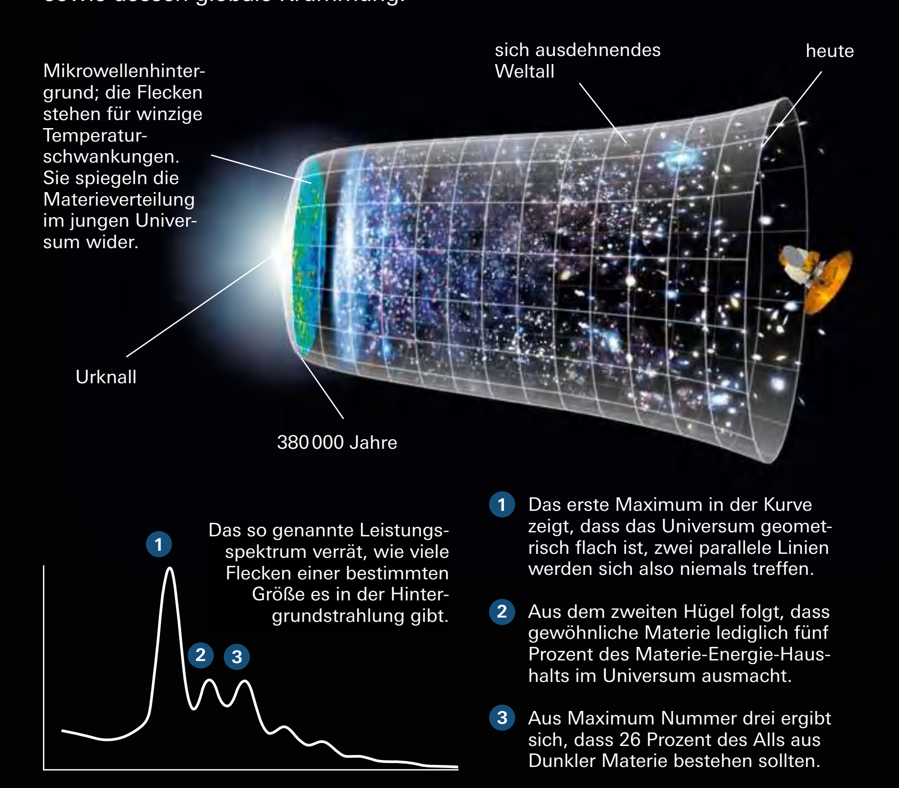
Im jungen Kosmos müssten sich Dichteschwankungen in dem Mix aus Strahlung und Materie hin- und herbewegt haben, ähnlich wie Schallwellen, die sich in einer Flüssigkeit ausbreiten. Welche Wellenlängen zum Zeitpunkt der Rekombination dominant waren, lässt sich aus der Größe und Verteilung der Flecken in der heutigen Hintergrundstrahlung ableiten – und das wiederum erlaubt Rückschlüsse auf die Eigenschaften des jungen Universums.

Aus dem fleckigen Oval, als das der Mikrowellenhintergrund oft dargestellt wird, lässt sich nicht nur die Verteilung der Materie rekonstruieren, sondern auch deren Menge im Weltall sowie das Verhältnis zur Gesamtenergie des Kosmos. Demnach muss das All neben gewöhnlicher Materie noch eine weitere, unsichtbare Materieform enthalten, die Dunkle Materie. Ohne sie ergibt das Babybild des Universums keinen rechten Sinn. 1982 brachte Peebles eine Form von Dunkler Materie ins Spiel, die aus eher massereichen und langsamen Partikeln besteht, Experten sprechen von »kalter« Dunkler Materie. Sie sollte für Jahrzehnte zur vorherrschenden Theorie bei der Suche nach der rätselhaften Substanz werden – auch weil Peebles mit ihrer Hilfe erfolgreich die Entstehung der Flecken in der Hintergrundstrahlung modellierte.

Zu guter Letzt half der Forscher von der Princeton University dabei, einen weiteren Pfeiler unseres heutigen kosmologischen Weltbilds in den Boden zu rammen: Aus der kosmischen Hintergrundstrahlung geht hervor, dass das All neben gewöhnlicher und Dunkler Materie enorm viel Energie enthält, die sage und schreibe 69 Prozent des Gesamtbudgets ausmachen soll. Aus

Kosmisches Erbe

Seit seiner Entstehung vor 13,8 Milliarden Jahren dehnt sich das Weltall immer weiter aus, wobei es sich laufend abkühlt. Rund 380000 Jahre nach dem Urknall war es kalt genug, dass sich neutrale Atome bildeten, womit sich Strahlung ungestört im All ausbreiten konnte. Sie ist heute noch als »kosmische Hintergrundstrahlung« an jedem Punkt des Himmels nachweisbar. Winzige Schwankungen in der Temperatur der Strahlung erlauben Rückschlüsse auf den Materie- und Energiehaushalt des Alls sowie dessen globale Krümmung.





Der Exoplanet 51 Pegasi b ist halb so groß wie der Jupiter und kommt seinem Stern sehr nahe, wie diese Illustration andeutet.

heutiger Sichtweise handelt es sich dabei um die ominöse Dunkle Energie, die in den Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie als »kosmologische Konstante« auftaucht und dort als eine Art Anti-Schwerkraft wirkt. Albert Einstein hatte diese Idee bereits 1917 gehabt, sie jedoch wieder verworfen. Peebles verhalf ihr 1984 zu einem Comeback: Er zeigte, dass eine kosmologische Konstante gemeinsam mit Dunkler Materie (und der in der Zwischenzeit ausgearbeiteten Idee einer explosionsartigen Inflationsphase nach dem Urknall) ein »flaches« Universum ohne globale Raumkrümmung ergeben müsste. Dass das All tatsächlich so aussieht, legen Beobachtungen seit den 1990er Jahren nahe.

Kurz vor der Jahrtausendwende bestätigten Astronomen dann einen weiteren Teil von Peebles' Prognose: Sie entdeckten, dass sich die Expansion des Alls zu beschleunigen scheint. Genau so würde man es erwarten, wenn das Vakuum mit Dunkler Energie gefüllt ist, die den Raum immer schneller größer werden lässt.

Dunkle Energie und Dunkle Materie sind mittlerweile ein fester Teil des Baukastens, mit dem Forscher die Entwicklung des Universums simulieren. Peebles gilt wegen seiner vielen Beiträge als einer der zentralen Architekten dieses »kosmologischen Standardmodells«. »Er ist eine ganz hervorragende Wahl für den Nobelpreis«, sagt Volker Springel vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching.

Das würden die allermeisten Astronomen sicherlich auch mit Blick auf die Exoplaneten-Entdecker Mayor und Queloz unterschreiben. Hier dürfte die Abwägung des Nobelkomitees allerdings schwieriger gewesen sein. Schließlich gab es schon vor dem Jahr 1995 Beobachtungen, die auf andere Planetensysteme hindeuteten. Bereits Ende der 1980er Jahre sorgten schwer interpretierbare Messdaten für Aufsehen, die man im Rückblick auf Exoplaneten zurückführen kann. 1992 entdeckten die Astronomen Aleksander Wolszczan und Dale Frail im System PSR B1257+12 sogar mehrere Himmelskörper. Sie kreisen jedoch nicht um einen normalen Stern, sondern um eine exotische Art von Sternleiche, einen so genannten Pulsar.

Der Planet befand sich dort, wo kein Planet sein sollte

Mayor und sein Doktorand Queloz wurden hingegen im Orbit von 51 Pegasi fündig, der unserer Sonne ähnelt. Als sie das Ergebnis auf einer Konferenz in Florenz präsentierten, ging die Nachricht als Sensation um die Welt. Dabei waren die Schweizer eher als Außenseiter in die Suche nach Exoplaneten gestartet. Anfang der 1990er Jahre engagierte sich hier vor allem eine US-amerikanische Gruppe um den Astronomen Geoffrey Marcy.

Die Amerikaner gingen damals einem ambitionierten Beobachtungsprogramm nach. Allerdings fahndeten sie vorrangig nach Signalen mit einer großen Umlaufdauer, denn in unmittelbarer Nähe eines Sterns sollte es eigentlich keine Planeten geben. So besagte es zumindest die damals vorherrschende Theorie zur Planetenentstehung.

Mayor und Queloz nahmen bewusst jene Sterne ins Visier, welche die Amerikaner ausgelassen hatten. Die Schweizer hatten dazu 1993 einen neuen Spektrografen am Observatoire de Haute-Provence im Südosten Frankreichs in Betrieb genommen. Damit konnten die Wissenschaftler die so genannte Rotverschiebung von Sternlicht sehr genau messen. Über sie lässt sich die Bewegung des Himmelskörpers in Blickrichtung ermitteln.

Kreist ein Planet um einen Stern, bewegen sich beide um einen gemeinsamen Schwerpunkt – der Stern gerät ein wenig ins Schlingern. Und genau das schien im System 51 Pegasi, 50 Lichtjahre von der Erde entfernt, der Fall zu sein: Die Daten von Mayor und Queloz sprachen für einen Gasplaneten von der halben Größe des Jupiters, der gerade einmal vier Tage für einen Umlauf um seinen Stern benötigt.

Mit einer »zweiten Erde« hatte der Exoplanet fast nichts gemeinsam, allein schon wegen einer errechneten Oberflächentemperatur von mehr als 1000 Grad Celsius. Aber bald darauf bestätigte das US-Team um Marcy die Entdeckung. Außerdem spürte es vergleichbare Welten im Orbit anderer Sterne auf.

In den folgenden zwei Jahrzehnten erlebte die Jagd nach Exoplaneten einen beispiellosen Boom. Mit den Entdeckungen des Weltraumteleskops Kepler fand sie ihren bisherigen Höhepunkt: Kepler spürte tausende Exoplaneten auf, setzte dabei jedoch auf ein anderes Verfahren als die Methode von Mayor und Queloz.

Heute kennen Astronomen bei etlichen Exoplaneten Masse, Durchmesser und den Abstand vom jeweiligen Mutterstern. Das ist genug für eine Art Planetenzensus, aber zu wenig, um die Kernfrage der Forschungsrichtung zu beantworten: Gibt es auch auf anderen Planeten Leben?

Daher steht die Exoplanetenforschung derzeit an der Schwelle zu einem neuen Kapitel: Mit besseren Teleskopen wollen Wissenschaftler die Atmosphären von erdgroßen Planeten analysieren – bisher ist dies nur bei deutlich voluminöseren Welten gelungen. Vielleicht lässt sich damit in den kommenden Jahrzehnten der Nachweis erbringen, dass manche Exoplaneten Lebewesen beherbergen.

Sollten einige von ihnen Intelligenz und ein Bewusstsein entwickelt ha-

ben, dürften sie sich beim Blick ins All ähnliche Fragen wie die Menschheit stellen: Woraus besteht die Dunkle Materie? Und was hat es mit der Dunklen Energie auf sich? »Wir müssen uns heute eingestehen, dass beide Phänomene nach wie vor absolut rätselhaft sind«, sagte James Peebles, als er per Telefon zur Nobelpreis-Pressekonferenz zugeschaltet wurde.

Somit dürften in Zukunft neue Ideen gefragt sein. Bei der Enträtselung der Dunklen Materie wähnen sich Physiker seit Längerem in einer Sackgasse und bringen verstärkt Alternativen zu Peebles' »kalter« Variante ins Spiel. Auch die Dunkle Energie sorgt für rauchende Köpfe: So mehren sich seit einigen Jahren die Indizien dafür, dass man sie mitnichten als kosmologische Konstante betrachten kann, vielmehr könnte sich ihre Dichte mit der Zeit verändern.

Kosmologen hoffen, dass eine neue Generation von Teleskopen auch hier die Antwort liefern wird. Parallel dazu sind mehr denn je findige Theoretiker gefragt. Sie müssen den richtigen Ideen nachspüren – am besten mit Mut zu kreativen Lösungen. »Ich habe im Lauf der Jahre viele falsche Ideen zu Papier gebracht«, gestand Peebles. »Aber letztlich bin ich daran gewachsen, genau wie die Kosmologie.« ◂

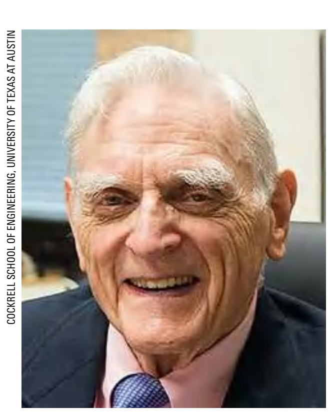
Robert Gast ist Physiker und »Spektrum«-Redakteur.

QUELLEN

Dicke, R.H. et al.: Cosmic black-body radiation. Astrophysical Journal 142, 1965

Mayor, M., Queloz, D.: A Jupiter-mass companion to a solar-type star. Nature 378, 1995

Peebles, P.J.E., Yu, J.T.: Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe. Astrophysical Journal 162, 1970



COCKRELL SCHOOL OF ENGINEERING, UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN



JONATHAN COHEN, BINGHAMTON UNIVERSITY



EUROPEAN PATENT OFFICE (EPO)

Den Nobelpreis für Chemie erhalten 2019 (von links nach rechts) John B. Goodenough (* 1922), M. Stanley Whittingham (* 1941) und Akira Yoshino (* 1948). Das Nobelkomitee würdigt damit ihre Verdienste um die Entwicklung des modernen Lithium-Ionen-Akkus.

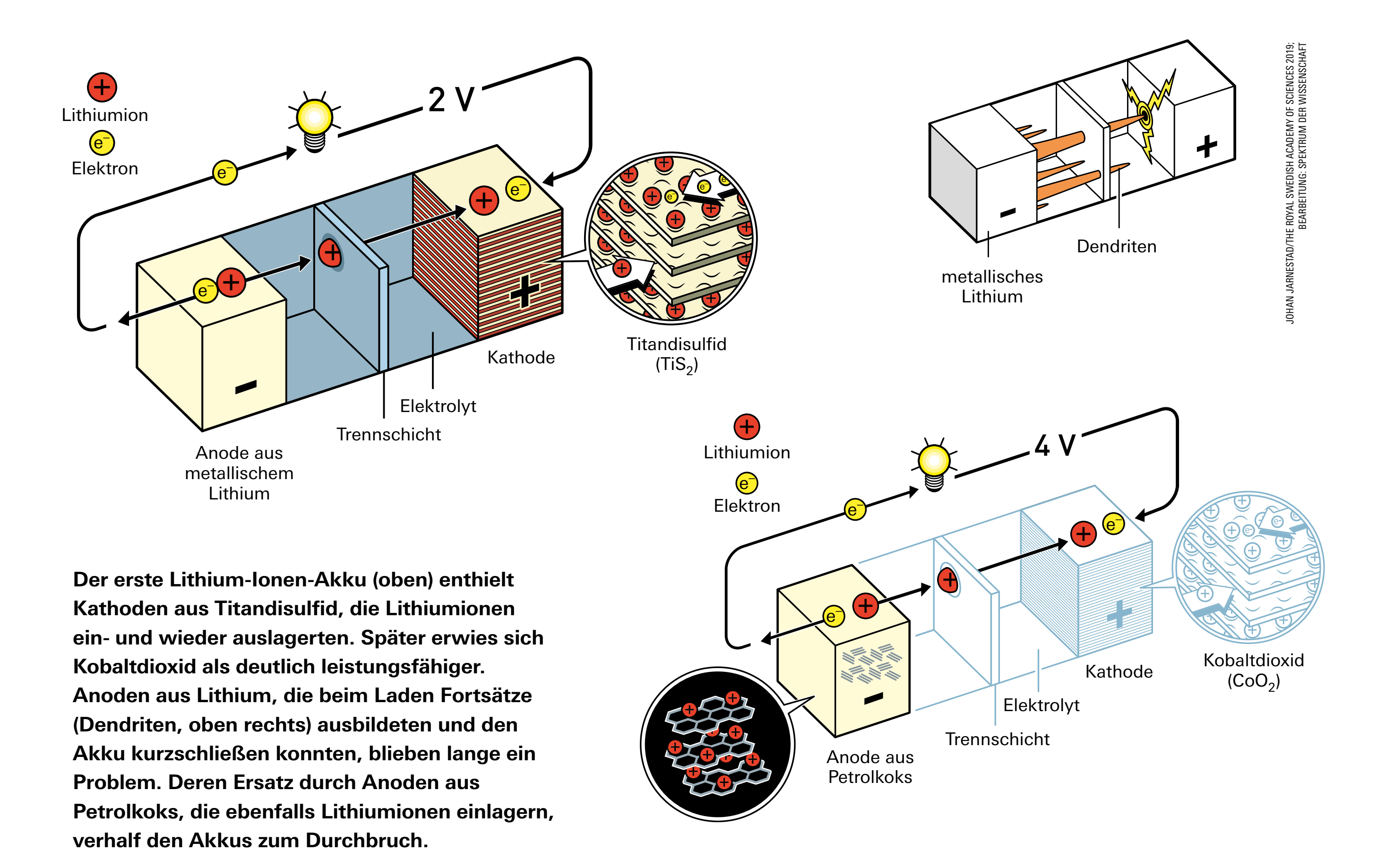
NOBELPREIS FÜR CHEMIE
DER WEG ZUM SICHEREN LITHIUM-IONEN-AKKU

Lithium ist ein ideales Metall für Energiespeicher – unglücklicherweise verhält es sich aber sehr reaktiv. Die Laureaten von 2019 haben das Element gezähmt und den Siegeszug der Lithium-Ionen-Akkus möglich gemacht.

▸ Einige Elemente des Periodensystems möchte man nicht in der Hosentasche haben. So zum Beispiel das extrem reaktive Lithium, um das man jedoch heutzutage nicht mehr herumkommt. Das leichteste der Metalle gibt seine Energie ebenso bereitwillig an einen Stromkreis ab wie an andere Reaktionspartner, Letzteres oft geradezu explosiv. Dass Lithium-Ionen-Akkus heute dennoch in den meisten tragbaren elektronischen Geräten stecken, verdanken wir den drei Wissenschaftlern, die dieses Jahr mit dem Chemie-Nobelpreis ausgezeichnet wurden.

Das Prinzip hinter dem Lithium-Ionen-Akku, die galvanische Zelle, ist seit Jahrhunderten bekannt. In ihrer Ursprungsform bestand sie aus zwei Metallen, die durch ein wassergetränktes Material getrennt waren. Entscheidend dabei ist, dass eine Seite dieses Sandwichs eine höhere Neigung hat, Elektronen abzugeben, also unedler ist als die andere.

Verbindet man beide Seiten durch einen weiteren Leiter, erhält man einen Stromkreis, in dem die fließenden Elektronen Arbeit verrichten können. Angetrieben wird er durch chemische Reaktionen in den beiden Hälften der galvanischen Zelle: Das unedlere Element gibt Elektronen an den Stromkreis und positiv geladene Metallionen in die Flüssigkeit ab, während die Elektronen in das edlere Metall fließen und dort ebenfalls eine chemische Reaktion auslösen.



Der erste Lithium-Ionen-Akku (oben) enthielt Kathoden aus Titandisulfid, die Lithiumionen ein- und wieder auslagerten. Später erwies sich Kobaltdioxid als deutlich leistungsfähiger. Anoden aus Lithium, die beim Laden Fortsätze (Dendriten, oben rechts) ausbildeten und den Akku kurzschließen konnten, blieben lange ein Problem. Deren Ersatz durch Anoden aus Petrolkoks, die ebenfalls Lithiumionen einlagern, verhalf den Akkus zum Durchbruch.

Physikalisch betrachtet ist Lithium ideal für eine Batterie, denn es hat unter allen Elementen die stärkste Neigung, sein äußerstes Elektron abzugeben, so dass potenziell hohe Spannungen möglich sind. Gleichzeitig ist es das leichteste Metall und gibt gemessen an seinem Gewicht viel Energie ab.

Wiederaufladbar ist eine Batterie, wenn alle Reaktionen auch rückwärts ablaufen, sobald der Strom in die Gegenrichtung fließt – und dies ist im Lithium-Ionen-Akku der Fall. All diese Eigenschaften machen ihn sehr attraktiv. Der Schönheitsfehler dabei ist allerdings, dass Lithium in elementarer Form mit Luft oder Wasser reagiert, und das unter Umständen recht heftig. Lange baute man solche Batterien daher aus ungefährlicheren Elementen.

Die Zähmung des Lithiums begann in den 1960er Jahren. Dazu musste man es zunächst strikt von Luft und Wasser trennen. Dies war bis dahin kaum möglich, denn Wasser übernahm in Batterien die wichtige Aufgabe, Ionen zu transportieren: Wenn ein Metall negativ geladene Elektronen an den Stromkreis abgibt, bleiben positiv geladene Ionen zurück. Diese wandern anschließend zur entgegengesetzten Elektrode, um dort die Ladungen der hereinströmenden Elektronen auszugleichen.

Erst um 1960 herum entwickelten Fachleute organische Flüssigkeiten, in denen sich Metallionen lösen können. Es waren spezielle Karbonate, bei welchen die anorganische Karbonatgruppe an einen Molekülteil aus Kohlenstoff und Wasserstoff gekoppelt ist, etwa Ethylenkarbonat.

Der Aufstieg der Schichtmaterialien

Den Pionieren der Technik schien offensichtlich, dass eine der beiden Elektroden aus metallischem Lithium sein müsse. Sie konzentrierten sich daher auf die andere Hälfte der Batterie: auf jenes Material, das die Elektronen wieder aufnimmt. Dieses sollte idealerweise Lithiumionen aufnehmen und wieder abgeben können, ohne dabei zu Schaden zu kommen, unerwünschte Stoffe einzulagern oder die aufgenommenen Ionen zu fest an sich zu binden.

Günstige Kandidaten dafür sind Materialien mit Schichtstrukturen: Feststoffe aus übereinandergestapelten Lagen, die untereinander nur geringe Bindungskräfte aufweisen und daher leicht gegeneinander zu verschieben sind. Zwischen den einzelnen Schichten können fremde Ionen sich dann wie Gäste einquartieren und ihre Herberge auch wieder verlassen.

Der nun mit dem Nobelpreis ausgezeichnete Stanley Whittingham stieß schließlich auf das hervorragend geeignete Titandisulfid: TiS_2 sei leicht, elektrisch leitfähig, und Lithiumionen könnten darin gut diffundieren, schrieb der Festkörperchemiker 1976 in der Fachzeitschrift »Science«. Tatsächlich lagert das Material bereitwillig Lithium-

ionen ein, und zwar so viele, bis auf jede TiS_2-Einheit ein Lithiumteilchen kommt, also eine Verbindung mit der Zusammensetzung $LiTiS_2$ vorliegt.

Man kann sich die Struktur von Titandisulfid wie ein Gitter aus negativ geladenen Sulfidionen (S^{2-}) vorstellen, die in jeder zweiten Schicht positiv geladene Ti^{4+}-Ionen beherbergen. Zwischen den titanhaltigen Lagen findet sich reichlich Platz, um andere Stoffe aufzunehmen. Und nicht nur das: Während die Ionen innerhalb der einzelnen Schichten relativ fest miteinander verbunden sind, herrschen zwischen den Lagen nur schwache Kräfte. Aus diesem Grund wandern Lithiumionen leicht in das Material hinein und wieder hinaus.

Whittingham zeigte, dass die Lithiumionen nach und nach die freien Plätze im Gitter besetzen, bis in der Verbindung zu gleichen Teilen Lithium- und Titanionen vorliegen. Um die positive Ladung der eingelagerten Li^+-Teilchen auszugleichen, nehmen die Titanionen die gleiche Menge an Elektronen aus dem Stromkreis auf. Jedes von ihnen ist nun nur noch dreifach statt vierfach positiv geladen. Kehrt man die Stromrichtung um, läuft die chemische Reaktion rückwärts – die Batterie ist wiederaufladbar.

Mit diesem viel versprechenden Stoff konstruierte Whittingham, der damals für den Energiekonzern Exxon forschte, 1976 den ersten Lithium-Ionen-Akku mit TiS_2-Elektrode. Alle Zeichen deuteten auf einen Erfolg hin: Die Zelle erreichte eine Spannung von 2,5 Volt, und mit optimierten Elektrolyten und einer verbesserten Kathode konnte der Akku 1100-mal ohne große Verluste wiederaufgeladen werden.

Das metallische Lithium blieb derweil jedoch ein hartnäckiges Problem – auch weil ein bisher unerwarteter Effekt den Entwicklern einen Strich durch die Rechnung machte. Sie stellten schnell fest, dass bei jedem neuen Ladezyklus kleine Bäumchen aus Lithium von der einen Elektrode zur anderen wuchsen. Sobald diese als Dendriten bezeichneten Strukturen beide Elektroden verbanden, gab es einen Kurzschluss, durch den immer wieder Batterien in Flammen aufgingen. Schließlich kapitulierte das Unternehmen vor dem renitenten Element.

Andere dagegen glaubten weiter an das Konzept und trieben die Suche nach noch besseren Kathodenmaterialien voran. Whittinghams Mit-Laureat John B. Goodenough, damals an der University of Oxford, sah in den Arbeiten seines Kollegen enormes Potenzial. Statt Sulfiden wählte er jedoch Oxide, also Verbindungen, in denen sich an Stelle der Schwefelatome Sauerstoffatome befanden. Das sollte, so seine Hypothese, die Einlagerung der Lithiumionen noch verbessern: Sauer-

stoffatome sind kleiner als die Schwefelatome und ziehen ihre Elektronen stärker an sich. Aus diesen beiden Gründen sollten sie noch bereitwilliger positiv geladene Teilchen in ihrem Gitter beherbergen.

Der entscheidende Vorteil: Beim Einlagern von Lithiumionen würde so mehr Energie frei, wodurch die mit der Batterie mögliche Spannung stiege. Tatsächlich fand Goodenough 1979 mit Kobaltdioxid das passende Material. Es ist analog zu Titandisulfid aufgebaut, liefert aber eine höhere Energie. Kombiniert mit einer Lithiumelektrode erreicht es eine Spannung von bis zu 5 Volt. In heutigen Lithium-Ionen-Akkus finden sich hauptsächlich Weiterentwicklungen der ursprünglichen CoO_2-Kathode mit Mischungen von Nickel, Mangan und Kobalt.

Mit den neuen Stoffen wurde jene Grundannahme hinfällig, die das gesamte Konzept nicht nur unbequem, sondern auch explosiv machte: dass der Akku unbedingt metallisches Lithium enthalten müsse. Denn mit so leistungsfähigen Elektroden war man nun nicht mehr auf das unberechenbare Metall angewiesen, um hohe Spannungen zu erzeugen. Dies demonstrierte bereits Goodenough, indem er die Lithiumelektrode durch Vanadiumdioxid ersetzte, in dem geringe Mengen an Lithium eingelagert waren.

Damit wandte sich das Feld dem Prinzip der Ionentransferzellen zu. In ihnen findet man kein metallisches Lithium mehr, sondern an beiden Elektroden Materialien, die Lithiumionen binden und deren Ladungen mit zusätzlichen Elektronen in ihrer eigenen Struktur ausgleichen. Die Lithiumionen reagieren nicht mehr vom Ion zum Metall und zurück, sondern wandern nur noch zwischen den Elektroden hin und her.

Es bot sich an, für die Entwicklung des Konzepts an die guten Erfahrungen mit Schichtmaterialien anzuknüpfen. Das bekannteste elektrisch leitende Schichtmaterial ist Graphit, von dem Fachleute gleichzeitig wussten, dass es gern Ionen einlagert. Doch diese naheliegende Lösung erwies sich als zu schön, um wahr zu sein. Die Metallionen fanden sich nicht annähernd so bereitwillig zwischen den Lagen ein, wie es bei den Schichtmaterialien der Kathode der Fall war – und einmal hineingezwängt, kamen sie nur schwer wieder heraus.

Schlimmer noch: Die Karbonate, die bisher das Lithium ohne Probleme von einer Elektrode zur anderen geleitet hatten, begannen, zwischen die Schichten zu dringen und sie auseinanderzustemmen. Dieser Effekt machte die Graphitelektroden bereits nach wenigen Ladezyklen unbrauchbar.

In den 1980er Jahren versuchte daher der bei der Asahi Kasei Corporation arbeitende Akira Yoshino, die damals recht neu entwickelten leitfähigen Polymere dazu zu bringen, Lithiumionen einzulagern. Der dritte Nobelpreisträger des Jahres 2019 kam jedoch bald zu dem Schluss, dass Schichten aus reinem Kohlenstoff die besten Chancen boten – trotz des Scheiterns von Graphit.

Ein Abfallprodukt entpuppt sich als nützlich

Graphitartige Schichtstrukturen kommen allerdings in vielen Formen vor. Yoshino versuchte es zuerst mit Kohlefasern, die er im Vakuum wachsen ließ, um sie mit möglichst geordneten Strukturen auszustatten. Wäre er mit diesem aufwändigen Prozess erfolgreich gewesen, wären die Batterien heute womöglich ein gutes Stück teurer. Aber dazu kam es nicht, denn die Arbeitsgruppe landete einen Volltreffer am anderen Ende der Preisskala – bei Petrolkoks.

Der Stoff entsteht im Wesentlichen als Abfall bei der Verarbeitung von Erdöl. Eine spezielle Variante des Materials vereint jedoch nach einer Hitzebehandlung alle gewünschten Eigenschaften: Sie enthält graphitartige Bereiche, die große Mengen an Lithiumionen binden, aber gleichzeitig auch ungeordnete Zonen, die das Graphit anscheinend stabilisieren und so verhindern, dass es auseinanderfällt. Dabei gibt sie immer noch viel bereitwilliger Elektronen ab als die andere Elektrode aus Kobaltoxid – und kann dadurch reichlich Energie liefern.

Mit diesen beiden Materialien konstruierte Yoshino den ersten Lithium-Ionen-Akku, der kein metallisches Lithium mehr enthielt; theoretisch sollte man damit vor Feuer und Explosionen gefeit sein. Allerdings ging der Chemiker wohlweislich auf Nummer sicher. Er überprüfte die Vorhersage mit einem eigens gebauten Testgerät, mit dem er schwere Gewichte auf die neu konstruierte Batterie fallen ließ. Per Fernsteuerung natürlich.

Sein Akku bestand den Test ohne Explosionen; ältere, metallhaltige Konstruktionen schnitten weniger gut ab. 1991 kam der erste Lithium-Ionen-Akku nach Yoshinos Modell auf den Markt. Er ebnete den Weg für leichtgewichtige elektronische Geräte wie Laptops, aber auch für die Elektromobilität.

Bei all dem können die Akkus ihr explosives Erbe nicht völlig verleugnen. Die Batterien enthalten zwar nicht mehr das hochreaktive Metall, Explosionen kommen wegen der energiereichen Elektrodenmaterialien dennoch bis heute immer wieder vor. So zum Beispiel bei einem dafür inzwischen berüchtigten Smartphone-Modell von Samsung, das hastig zurückgerufen werden musste. Auch Laptop-Batterien können Probleme verursachen, und 2013 fing sogar eine Batterie einer Boeing 787 Feuer. Ganz gezähmt ist das widerspenstige Lithium also immer noch nicht. ◂

Lars Fischer und **Verena Tang** sind Chemiker und Redakteure bei »Spektrum.de« sowie bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Mizushima, K. et al.: Li_xCoO_2 $(0<x\leq-1)$: A new cathode material for batteries of high energy density. Materials Research Bulletin 15, 1980

Whittingham, M.S.: Electrical energy storage and intercalation chemistry. Science 192, 1976

Yoshino, A.: The birth of the lithium-ion battery. Angewandte Chemie International Edition 51, 2012

LITERATURTIPP

Ducci, M., Oetken, M.: Lithiumakkus – die nächste Generation? Spektrum der Wissenschaft 4/2019, S. 62–65

Neuere Lithium-Ionen-Akku-Entwicklungen zum Nachbauen für daheim







William George Kaelin (* 1957, links) forscht als Onkologe an der Harvard Medical School, Peter John Ratcliffe (* 1954, Mitte) arbeitet als Mediziner an der University of Oxford. Ebenfalls Mediziner ist Gregg Leonard Semenza (* 1956, rechts), der an der Johns Hopkins University wirkt.

NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE ODER MEDIZIN
DIE SAUERSTOFFSENSOREN DER ZELLE

Die drei diesjährigen Nobelpreisträger haben maßgeblich dazu beigetragen, den Mechanismus zu entschlüsseln, mit dem Zellen auf Sauerstoffmangel reagieren. Funktioniert dieser nicht richtig, kann es zu schweren Problemen kommen.

Alle Zellen in unserem Körper wandeln auf einem schmalen Grat zwischen zu hohen und zu niedrigen Sauerstoffkonzentrationen. Einerseits benötigen sie O_2 für die Energiegewinnung, andererseits ist das Gas im Überschuss giftig und tödlich. Deswegen reagieren die Zellen schnell, wenn der Sauerstoffgehalt in der Umgebung sich aus irgendwelchen Gründen verändert.

Das biologische Sensorium hierfür ist entsprechend hoch entwickelt, wie man nach jahrzehntelanger Forschung mittlerweile weiß. Drei Wissenschaftler haben für entsprechende Arbeiten nun den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 2019 erhalten: William G. Kaelin, Peter J. Ratcliffe und Gregg L. Semenza teilen sich die Auszeichnung für ihre Erkenntnisse darüber, wie Zellen Sauerstoff wahrnehmen und damit umgehen.

Mit der reaktionsfreudigen Substanz müssen sich Lebewesen schon seit zwei bis drei Milliarden Jahren arrangieren: Zu dieser Zeit hatten Zyanobakterien in großem Maßstab damit begonnen, Fotosynthese zu betreiben und deren Abfallprodukt O_2 in die Umwelt zu entlassen. Wegen seiner chemischen Aggressivität wirkte Sauerstoff auf die damaligen Organismen allerdings giftig, weshalb sie zunächst Abschottungs- und Entgiftungsmechanismen entwickelten. Schon bald aber nutzten einige anpassungsfähige Zellen die freie Verfügbarkeit des Gases und entwickelten Werkzeuge für die Sauerstoffatmung: einen Stoffwechselweg, bei dem Moleküle aus der Nahrung effizient und unter konkurrenzlos hohem Energiegewinn mit Sauerstoff verbrannt werden. Zelluläre Kraftwerke mit entsprechender molekularer Maschinerie fanden dann schließlich als Mitochondrien ihren Weg in die Gewebe von Vielzellern.

Heute können die Sauerstoff atmenden Zellen unseres Körpers kaum mehr längere Zeit ohne die Substanz überleben: Ein O_2-Mangel – die so genannte Hypoxie – führt zum Zelltod oder zumindest zur energetischen Unterversorgung mit oft schweren Folgeschäden. Ohne ausreichende Sauerstoffversorgung können Zellen nur noch einen Bruchteil der zuvor umgesetzten Energie bereitstellen. Sie sind dann auf wenig Energie liefernde Stoffwechselwege als »Überbrückungslösung« angewiesen, was beispielsweise der französische Biochemiker Louis Pasteur (1822–1895) als einer der Ersten genauer beschrieb.

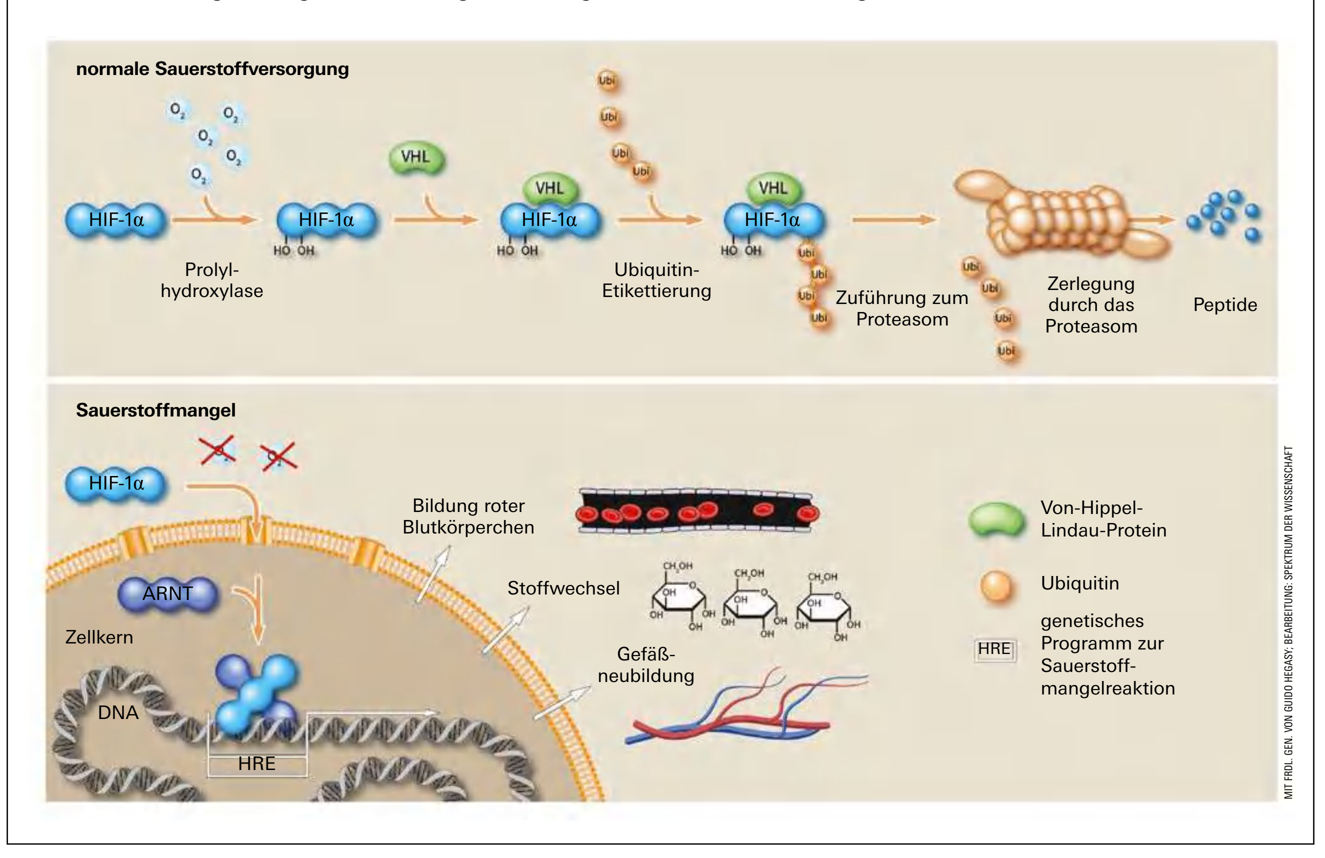
Im Lauf der Evolution entstanden allerlei Mechanismen, mit denen Organismen den O_2-Gehalt ihrer Umgebung abschätzen und sich auf seine Schwankungen einstellen können. Im Jahr 1938 erhielt der belgische Pharmakologe Corneille Heymans (1892–1968) den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin für seine Forschung zum Glomus caroticum des Menschen – einem Zellbündel, das an der Abzweigung der beiden Halsschlagadern liegt und dem Hirn signalisiert, wie es um die Sauerstoffversorgung des Körpers steht. Je nach Lage der Dinge sorgen die Atemzentren im Gehirn dann zum Beispiel dafür, dass wir schneller und tiefer atmen, um mehr O_2 ins Blut zu bekommen.

Natürliches Blutdoping

Schon im frühen 20. Jahrhundert war den Physiologen klar, dass der Körper auf den Input des Glomus caroticum irgendwie reagieren muss. Wie sie schließlich erkannten, spielt eine zentrale Rolle hierbei das Hormon Erythropoetin (»Epo«). Es entsteht vor allem in den Nieren vermehrt bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen im Blut – etwa bei längerem Aufenthalt in der dünnen Luft großer Höhen – und kurbelt die Produktion

Gute Zeiten, schlechte Zeiten

Bei Sauerstoffmangel sammelt sich das Protein HIF-1α im Zellkern und dockt gemeinsam mit einem weiteren Eiweiß namens ARNT an bestimmte Sequenzen auf der DNA an (unten). Dies aktiviert ein genetisches Programm einer Sauerstoffmangelreaktion, die dabei hilft, sich an niedrige O_2-Konzentrationen anzupassen. Ist der Sauerstoffgehalt hingegen normal, so wird HIF-1α rasch vom zellulären Abfallbeseitigungssystem, dem Proteasom, zerlegt (oben). HIF-1α muss hierfür von bestimmten Enzymen, so genannten Prolylhydroxylasen, zwei Hydroxygruppen (OH) verpasst bekommen haben – was nur bei hinreichend hohem O_2-Gehalt geschieht. Bloß dann bildet es einen Komplex mit dem Protein VHL und wird dem Proteasom zugeführt. HIF-1α und damit das von ihm regulierte genetische Programm hängen somit vom Sauerstoffgehalt in der Zelle ab.



roter Blutkörperchen an, wodurch das Blut mehr Sauerstoff transportiert. Dies macht Epo als Substanz zur Leistungssteigerung interessant: In den 1990er Jahren avancierte es zu einem schwer nachweisbaren Dopingmittel für Spitzensportler.

Wie die gemessene Sauerstoffmenge im Körper die Epo-Produktion steuert, war allerdings lange unklar. Gregg Semenza von der Johns Hopkins University, einer der jetzt ausgezeichneten Laureaten, nahm sich dieses Rätsels an. Zu Beginn der 1990er Jahre experimentierte er mit gentechnisch veränderten Mäusen und fand nach und nach heraus, dass einige DNA-Abschnitte, die in der Nähe der Epo-Gene liegen, mit darüber entscheiden, wie Zellen auf O_2-Unterversorgung reagieren.

In Versuchen an Zellkulturen entpuppte sich eine DNA-Region hierbei als besonders wichtig. Sie enthält einen so genannten Enhancer, also eine Basenabfolge, an den bei Sauerstoffmangel vermehrt bestimmte Signalproteine koppeln, nämlich die »HIF« (Hypoxie-induzierbare Faktoren). Semenza und seine Kollegen beschrieben diese Signalproteine namens HIF-1α und HIF-1β genauer, wobei sich Letzteres als alter Bekannter entpuppte – es handelte sich um das Protein ARNT (aryl hydrocarbon receptor nuclear translocator).

Was tun HIF-1α und ARNT genau? Rasch wurde klar: Lediglich die Produktion des Ersten hängt vom Sauerstoffgehalt ab. Bei hohen O_2-Konzentrationen findet sich fast kein HIF-1α in der Zelle. Fällt die Sauerstoffkonzentration jedoch, taucht HIF-1α vermehrt auf und koppelt an den passenden Enhancer, was die Epo-Produktion ankurbelt. Dieser Mechanismus wirkt nicht nur in den Nieren, sondern anscheinend in den meisten Körperzellen, wie Semenza und zeitgleich mit ihm auch der zweite Laureat, Peter

Ratcliffe von der University of Oxford, erkannten. Offenbar war man einem grundlegenden Regelkreis auf der Spur.

An diesem Punkt stiegen weitere Arbeitsgruppen in das Forschungsgebiet ein und nahmen die HIF-Signalproteine näher unter die Lupe. Es zeigte sich, dass HIF-1α unter normalen Bedingungen rasch von der zellulären Abfallbeseitigungsmaschine, dem Proteasom, zerlegt wird. Die Zelle markiert zu entsorgende Moleküle mit der Signalsubstanz Ubiquitin. Den HIF-1α-Proteinen verpasst sie solche Etiketten bei normalem Sauerstoffgehalt sehr schnell, wie die Wissenschaftler erkannten. Doch wie genau hilft das, auf schwankende O_2-Konzentrationen zu reagieren?

Hier kommt der dritte Laureat ins Spiel, William Kaelin von der Harvard Medical School. Seine Kollegen und er forschten eigentlich über Krebserkrankungen, genauer über die Von-Hippel-Lindau-Krankheit – ein seltenes erbliches Tumorleiden, bei dem Wucherungen in verschiedenen Organen auftreten können. Zum Krankheitsgeschehen trägt maßgeblich bei, dass die genetische Bauanleitung für das Protein VHL mutiert ist, weshalb dieses nicht mehr funktioniert. Ohne arbeitsfähiges VHL sammeln sich massenhaft Eiweiße an, die der Organismus sonst nur bei drastischer Sauerstoffunterversorgung herstellt, und die betroffenen Zellen entarten vielfach. Weitere Studien halfen, die Aufgabe von VHL zu entschlüsseln: Es gehört zu jenen Proteinen, die für die Markierung zellulären Abfalls mit Ubiquitin zuständig sind.

Komplizierter Regelkreis für das Sauerstoff-Management

Ratcliffe und seine Kollegen verknüpften all diese Informationen schließlich. Sie zeigten, dass VHL in allen Zellen mit normaler Sauerstoffzufuhr das HIF-1α rasch zur Entsorgung frei gibt. Dies geschieht allerdings nur, wenn HIF-1α vorher von bestimmten Enzymen, den Prolylhydroxylasen, zwei Hydroxygruppen angehängt bekommt – was nur bei hinreichend hohem O_2-Gehalt der Fall ist. Mangelt es an Sauerstoff, erhält HIF-1α keine Hydroxygruppen, somit – seitens VHL – auch kein Ubiquitin-Etikett und wird folglich nicht abgebaut. Es sammelt sich dann im Zellkern an und heftet sich mit Hilfe von ARNT an den passenden Enhancer auf der DNA, was wiederum die Produktion von Epo ankurbelt und darüber verschiedene Prozesse im Körper auslöst, die dabei helfen, mit schlechter Sauerstoffversorgung zurechtzukommen.

Zu diesen Prozessen gehört, wie erwähnt, die vermehrte Bildung roter Blutkörperchen, aber auch die Neubildung von Blutgefäßen (»Angiogenese«), um Körpergewebe durch stärkere Blutzufuhr besser zu versorgen. Das spielt eine Rolle bei manchen Nierenerkrankungen, bei denen das Gewebe dauerhaft zu wenig Epo herstellt, was zu mangelnder Blutversorgung führt. Das Gegenteil tritt bei vielen Krebserkrankungen ein: Hier kurbelt der Tumor die Epo-Produktion an, um die Gefäßneubildung zu fördern und damit seine eigene Blutversorgung zu verbessern. Schon seit einiger Zeit sind Medikamente in der Entwicklung, die – auf Basis der beschriebenen Erkenntnisse – das Gefäßwachstum in Richtung Tumor unterbinden sollen, um den Krebs einzudämmen. Dabei möchten die Forscher besonders HIF-1α ins Visier nehmen, denn Zellen ohne dieses Protein reagieren deutlich empfindlicher auf eine Chemotherapie und lassen sich mit weniger Arzneistoff bekämpfen.

Das Sauerstoffsensorium der Zellen spielt eine große Rolle im Stoffwechsel, bei sportlicher Aktivität, bei der Anpassung an große Höhen und bei der Krebsentstehung. Wo die zelluläre Sauerstoffmessung ausfällt, kommt es zu Vergiftungs- und Krankheitserscheinungen; wo sie künstlich manipuliert wird, sind Doping oder auch Krebsbekämpfung möglich. Die Laureaten haben Grundlagen gelegt, um hier in alle möglichen Richtungen weiterforschen zu können. ◂

Jan Osterkamp ist Redakteur bei »Spektrum.de«.


BRYCE VICKMARK; MIT FRDL. GEN. VON MIT NEWS OFFICE


HARVARD UNIVERSITY

Esther Duflo (* 1972, links) und ihr Ehemann und ehemaliger Doktorvater Abhijit Banerjee (* 1961, Mitte) forschen beide am Massachusetts Institute of Technology. Michael Kremer (* 1964, rechts) ist Wirtschaftswissenschafter an der Harvard University. Die drei Ökonomen führten gemeinsam viele Feldstudien in Entwicklungsländern durch.

NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN MIT EXPERIMENTEN GEGEN ARMUT

Die schwedische Reichsbank verleiht den Preis für Ökonomie im Gedenken an Alfred Nobel an Abhijit Banerjee, Esther Duflo und Michael Kremer für ihren »experimentellen Ansatz zur Linderung der globalen Armut«.

Fast auf der ganzen Welt hat sich der Lebensstandard in den letzten 20 Jahren verbessert – dennoch leben immer noch über 700 Millionen Menschen in extremer Armut. Die Entwicklungsökonomie beschäftigt sich damit, welche Ursachen es für die unterschiedlichen Vermögensverteilungen gibt und wie man die Situation verbessern kann.

Diesen Bereich der Volkswirtschaftslehre haben die Laureaten Abhijit Banerjee, Esther Duflo, beide am Massachusetts Institute of Technology (MIT), und Michael Kremer von der Harvard University in den letzten 20 Jahren entscheidend geprägt, wofür sie jeweils ein Drittel des prestigeträchtigen Preises erhielten.

Die 47-jährige Duflo ist nicht nur die jüngste Person in der 50-jährigen Geschichte der Auszeichnung, sondern zudem erst die zweite Frau, die sie erhält. Auch die beiden anderen Ökonomen liegen mit 55 und 58 Jahren deutlich unter dem bisherigen Altersdurchschnitt von 67 Jahren.

Um Armut und ihre Ursachen zu verstehen, untersuchten Banerjee, Duflo und Kremer mikroökonomische Probleme mit experimentellen Methoden. Dieser Ansatz führte zu einer noch heute andauernden Flut an spannenden wissenschaftlichen Arbeiten, deren empirisch gewonnene Erkenntnisse helfen, die weltweite Armut zu verringern.

Eines der größten Probleme in Entwicklungsländern ist die mangelnde Schulbildung: Etwa die Hälfte aller Kinder weltweit beenden die Schule, ohne richtig lesen, schreiben oder rechnen zu können. Deshalb suchte Michael Kremer Mitte der 90er Jahre nach bezahlbaren Maßnahmen, die die Leistung der Schüler steigern könnten. Doch statt sich in seinem Büro theoretischen Modellen zu widmen, wählte er einen für Entwicklungsökonomen bis dahin wenig verbreiteten Ansatz: Er reiste mit Kollegen in ländliche Gegenden von Kenia und führte zusammen mit dort ansässigen Nichtregierungsorganisationen (NGOs) Feldstudien an verschiedenen Schulen durch.

Dazu suchten die Forscher etwa 100 finanzschwache Schulen aus und teilten sie zufällig in verschiedene Gruppen ein. Einige erhielten Sachgüter wie Lehrbücher oder Flipcharts, welche die Schüler beim Lernen unterstützen sollten. Andere bekamen dagegen kostenfreie Speisen, da viele Kinder aus den ärmlichen Gegenden zu Hause nicht frühstücken und ihren Schultag hungrig verbringen.

Die durchgeführten Feldversuche zählen zur Kategorie der »randomisierten kontrollierten Studien«, weil die Wissenschaftler die Schulen zufällig in die verschiedenen Gruppen verteilten und die Ergebnisse genau begutachten konnten. Solche Studien sind schon lange in der Medizin verbreitet, da sie eindeutige Fragestellungen beantworten und kausale Zusammenhänge belegen können. In den Wirtschaftswissenschaften wurde diese Methode damals dagegen kaum genutzt.

Bildung ist keine Materialschlacht

Als Kremer und sein Team nach einigen Monaten die schulischen Ergebnisse der Kinder untersuchten, waren sie überrascht: Weder die kostenlosen Speisenangebote noch die zusätzlichen Lehrmittel führten zu einer Leistungssteigerung. Offenbar genügt es nicht, einfach mehr Ressourcen zur Verfügung zu stellen, sondern es braucht tiefgreifendere Maßnahmen für bessere Bildung.

Aus diesem Grund reiste die französische Ökonomin Esther Duflo im Jahr 2000 mit ihrem ehemaligen Doktorvater Abhijit Banerjee, mit dem sie heute verheiratet ist, sowie anderen Forschern nach Indien. Zusammen mit einer großen NGO bauten die Wissen-

schaftler in zwei verschiedenen Städten, Mumbai und Vadodara, ein zweijähriges Nachhilfeprogramm auf, an dem bis zu 10 000 Schüler außerhalb des Unterrichts teilnehmen konnten. Dieses Mal waren die Forscher erfolgreich: Die Ergebnisse der Schüler verbesserten sich drastisch.

Auch spätere empirische Studien weisen darauf hin, dass die schlechte Schulbildung in vielen Entwicklungsländern nicht auf mangelnde Ressourcen zurückgeht. Das Hauptproblem sind offenbar der Unterricht und die Lehrpläne, die nicht zu den Bedürfnissen der Schüler passen. Zudem fehlen viele Lehrer häufig, weshalb der Unterricht ausfällt.

Um die Motivation der Lehrer zu erhöhen, untersuchten Duflo, Kremer und ihre Kollegen 2015, wie sich befristete Arbeitsverträge – die nur bei positiven Ergebnissen verlängert werden – auf die Fehltage der Lehrer und die Lernerfolge der Schüler auswirken. In einem anderen Versuch verkleinerten die Forscher die Schulklassen, wodurch die Lehrer weniger Schüler betreuten. Während der Unterricht mit weniger Kindern zu keiner merklichen Verbesserung führte, fielen die schulischen Leistungen der Schüler bei Lehrern mit befristeten Verträgen deutlich höher aus.

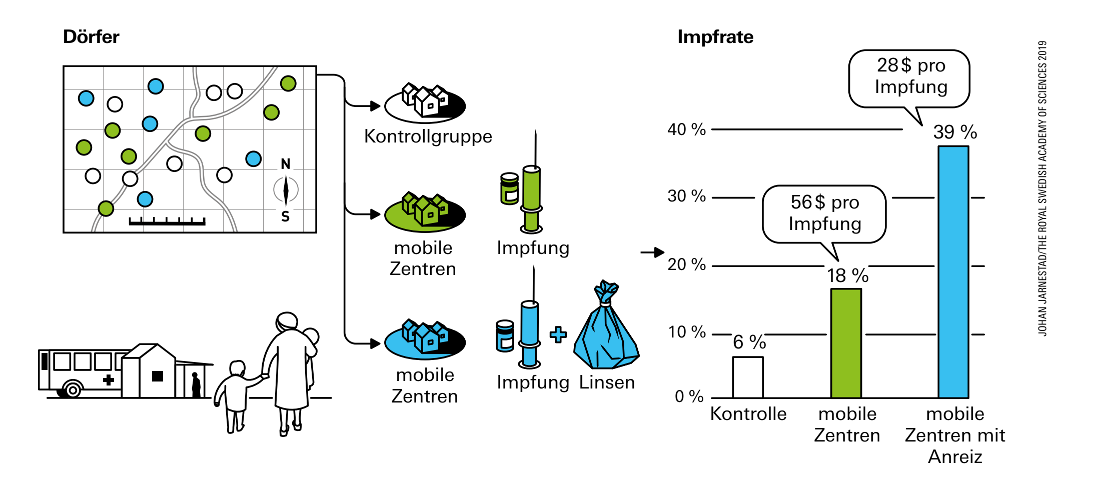
Mangelnde Schulbildung ist aber bei Weitem nicht das einzige Problem von Entwicklungsländern. Beispielsweise stehen die schlechte Gesundheitsversorgung oder die ungleiche Behandlung der Geschlechter einer Verbesserung der Situation im Weg. Daher widmeten sich die drei Laureaten in späteren Arbeiten auch diesen Themen.

So fand Duflo mit ihrem Team 2009 heraus, dass eine Frauenquote bei führenden politischen Ämtern in indischen Dörfern die Vorurteile gegenüber Politikerinnen abbaut. Hierfür benutzten die Forscher erstmals in einer wirtschaftswissenschaftlichen Studie einen aus der Sozialpsychologie stammenden impliziten Assoziationstest. Damit legten sie den Grundstein für neue Arbeitsmethoden im Bereich der Genderpolitik.

Ein Jahr später ging Duflo mit Banerjee und anderen Kollegen der Frage nach, warum finanziell benachteiligte Familien in Entwicklungsländern so wenig präventive gesundheitliche Angebote nutzen, die kaum etwas kosten oder gar gratis sind. Dabei fiel ihnen auf, dass das Personal im Gesundheitswesen häufig abwesend ist. Die Forscher eröffneten deshalb in einigen Dörfern mobile Impfzentren, bei denen immer ein Mitarbeiter anzutreffen war.

Tatsächlich verdreifachte sich die Impfrate mit diesem Angebot von 6 auf 18 Prozent. Eine weitere Erhöhung auf 39 Prozent erreichten die Wissenschaftler, als sie zusätzliche Anreize schufen, etwa indem sie pro Impfung eine Packung Linsen verschenkten.

Um die Impfrate in Entwicklungsländern anzuheben, testeten die Forscher mobile Impfzentren (grün). Indem sie eine Packung Linsen pro Impfung verschenkten, konnten sie die Rate weiter anheben (blau). Dadurch fielen auch die Kosten pro Behandlung geringer aus (rechts).



JOHAN JARNESTAD/THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES 2019

Aktuell analysieren viele Ökonomen, wie man die Quote weiter anheben kann – schließlich bleiben in der Studie selbst im besten Fall 61 Prozent der Bevölkerung ungeimpft.

Entwicklungsforscher suchen aber nicht bloß nach neuen Maßnahmen, um die Armut zu senken, sondern testen auch, wie hilfreich bisherige Mittel sind. 2015 widmeten sich Banerjee, Duflo und ihr Team den Mikrokredit-Vergaben in indischen Städten, für die Muhammad Yunus und die Grameen Bank 2006 den Friedensnobelpreis erhielten. Durch ihre randomisierten Studien stellten die diesjährigen Preisträger unerwarteterweise fest, dass das zuvor hoch gelobte Konzept weder nach 12 noch nach 18 Monaten zu deutlichen Verbesserungen führte – die unterstützten Personen waren nicht gesünder, gebildeter und konnten auch nicht mehr konsumieren. Auch Frauen wurden dadurch nicht wie erhofft gestärkt. Ähnliche Untersuchungen in anderen Entwicklungsländern untermauern das enttäuschende Ergebnis.

Um die globale Armut zu bekämpfen, genügt es nicht, die Gründe für die Probleme zu kennen, man muss auch die betroffenen Menschen verstehen. Deshalb ist die Verhaltensökonomie ein wichtiger Teil der Armutsforschung. So stellten sich Duflo, Kremer und ihre Kollegen 2011 die Frage, warum Kleinbauern in Entwicklungsländern nicht in vergleichsweise einfache Neuerungen wie Kunstdünger investieren, die zu wesentlich besseren Erträgen führen würden. Eine Erklärung dafür ist die Tendenz von Menschen, der Gegenwart so viel Bedeutung zuzuschreiben, dass man Investitionen auf später verschiebt.

Dieses Verhaltensmuster konnten Duflo und Kremer in einer Feldstudie empirisch belegen. Dazu konfrontierten sie zwei Gruppen kenianischer Bauern mit unterschiedlichen Angeboten: Der einen gewährten sie einen kurzzeitigen Rabatt auf Kunstdünger, der bald endete, während die andere Gruppe einen dauerhaften – aber wesentlich höheren – Preisnachlass auf das gleiche Produkt erhielt. Wie sich herausstellte, tätigte die Gruppe der Kleinbauern mit dem kurzfristigen Angebot 50 Prozent mehr Käufe.

Lokal forschen, global denken

Mit Kollegen untersuchte Kremer 2007 erstmals in einer experimentellen Studie, wie stark Preise das Kaufverhalten von einkommensschwachen Personen beeinflussen. Dazu stellten die Forscher zwei Gruppen ein Entwurmungsmittel zur Verfügung, einmal für den subventionierten Preis von umgerechnet 36 Cent und im anderen Fall umsonst. Es zeigte sich, dass von Armut betroffene Personen wesentlich preissensitiver sind, als Ökonomen bisher angenommen hatten: Während 75 Prozent aller Eltern das kostenfreie Präparat für ihre Kinder besorgten, waren es bei der subventionierten Variante nur 18 Prozent. Diese und ähnliche Analysen haben spätere Arbeiten zur Verhaltensökonomie in Entwicklungsländern stark geprägt.

Verglichen mit globalen volkswirtschaftlichen Modellen spielten sich die Feldstudien der drei Ökonomen in sehr kleinem Maßstab ab – selbst wenn tausende oder gar zehntausende Menschen an den Studien teilnahmen. Es stellt sich die Frage, inwiefern sich die Ergebnisse verallgemeinern lassen. Dazu verfassten Banerjee, Duflo und Kremer mehrere Arbeiten, in denen sie ihre experimentellen Funde mit theoretischen Wirtschaftsmodellen verbanden und dabei neue Methoden etablierten, um Nebeneffekte zu berücksichtigen, die in makroökonomischen Kontexten auftauchen.

Insgesamt haben die Erkenntnisse der drei Forscher etliche politische Entscheidungen weltweit beeinflusst. Auch wenn es schwer ist, die genauen Auswirkungen ihrer Arbeit zu bestimmen, haben dank ihnen inzwischen mehr als fünf Millionen indische Kinder Zugang zu außerschulischem Nachhilfeunterricht. Zudem haben Banerjee und Duflo das US-amerikanische Forschungszentrum »Abdul Latif Jameel Poverty Action Lab« (J-PAL) mitbegründet. Mehr als 400 Millionen Personen profitierten nach Aussagen des Instituts von Programmen, die auf J-PAL-Forschungsprojekten beruhen. ◂

Manon Bischoff ist Physikerin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Banerjee, A.V., Duflo, E.: The experimental approach to development economics. Annual Review of Economics, Annual Reviews 1, 2009

Kremer, M. et al.: The challenge of education and learning in the developing world. Science 340, 2013



SPRINGERS EINWÜRFE
GLEICHHEIT UND GERECHTIGKEIT

»Gleiches Recht für alle« ist ein schönes Motto – doch funktioniert es in einer Welt mit ungleich verteilten Chancen?

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

⏩ spektrum.de/artikel/1681128

Vor dem Gesetz sind alle gleich, heißt es. Aber ist das auch gerecht? Der französische Schriftsteller Anatole France schrieb 1919 ironisch von »der majestätischen Gleichheit des Gesetzes, das Reichen wie Armen verbietet, unter Brücken zu schlafen, auf den Straßen zu betteln und Brot zu stehlen«. Die Lebenschancen sind nun einmal ungleich verteilt. Und der gern zitierte Satz in der Präambel der amerikanischen Unabhängigkeitserklärung von 1776 behauptet ja nicht, alle Menschen seien gleich, sondern er lautet: Sie seien »gleich erschaffen worden«. Wie sie sich dann durchs Leben schlagen, ist ganz eine andere Geschichte.

Eine systematische Untersuchung der Frage, wie ein Interessenausgleich zwischen finanziell verschieden ausgestatteten Individuen glücken kann, hat kürzlich ein Team um den Ökonomen Oliver P. Hauser von der britischen University of Exeter angestellt; zu der Gruppe zählte auch ein Doyen der evolutionären Spieltheorie, der gebürtige Österreicher Martin A. Nowak von der Harvard University *(Nature 572, S. 524–527, 2019)*.

Wie kann sich im spieltheoretischen Simulationsmodell Kooperation etablieren? Normalerweise unterstellt man, alle Akteure seien von Haus aus einander ebenbürtig; jeder sei gleichermaßen auf den eigenen Vorteil bedacht und agiere im Prinzip sehr ähnlich. So ein Modellmensch neigt anfangs nicht dazu, etwas zum Nutzen der Gruppe zu tun – außer der Gemeinsinn wird belohnt, etwa indem sich ein anderer Mitspieler bei wiederholten Begegnungen nun seinerseits kooperativ verhält, wodurch beide mehr gewinnen als einer allein.

Auf diese Weise kann eine Gesellschaft von Egoisten allmählich dazu übergehen, im wohlverstandenen Eigeninteresse zusammenzuarbeiten. So wird die Kooperation unter gewissen Umständen »evolutionär stabil«. Die fiktiven Teilnehmer am Gesellschaftsspiel gewöhnen sich an, einen Beitrag zum Gemeineigentum zu leisten.

Hauser und sein Team wollten nun wissen, ob so etwas auch funktionieren kann, wenn die Individuen von vornherein verschieden sind – und zwar in dreierlei Hinsicht. Man stattete die Modellpersonen mit unterschiedlichem »Einkommen« aus sowie mit schwankender Bereitschaft, etwas davon dem Gemeinwohl zuliebe als »Spende« abzugeben. Außerdem variierte die »Zuwendung«, die dem Einzelnen dafür aus dem Gemeingut zuteilwurde. Unter welchen Bedingungen entsteht dabei stabile Kooperation?

Ein Ergebnis lautet: Extreme Einkommensungleichheit – einer hat fast alles, die anderen nahezu nichts – macht Kooperation unmöglich. Interessanter ist, dass sich soziale Unterschiede kompensieren lassen, wenn die besser ausgestatteten Spieler zugleich spendabler sind. Das gilt freilich auch umgekehrt: Die Zusammenarbeit gelingt nur, solange die großzügig spendenden Teilnehmer über ausreichendes Einkommen verfügen; sonst verarmen sie rapide.

Tatsächlich entspräche eine idealtypische soziale Marktwirtschaft diesem Prinzip. Zwar herrscht unter uns beträchtliche Ungleichheit, aber dafür wird den Wohlhabenderen durch soziale Umverteilung eine »Spende« abgenötigt; sie verhindert, dass immer mehr Ärmere mangels Zuwendung nicht mehr kooperieren können. Andererseits darf die Umverteilung nicht dazu führen, dass die Bessergestellten verarmen und bald nichts mehr hergeben können.

Wie die Forscher betonen, ist das Spiel mit der Ungleichheit eine riskante Angelegenheit. Kooperation funktioniert nur bei einer ganz bestimmten Kombination der Parameter Einkommen, Spende und Zuwendung. Im wirklichen Leben finden es Wohlhabende oft ungerecht, dass ihnen ein erklecklicher Batzen für das gemeine Wohl abgeknöpft wird. Dann mag sie Hausers Modellspiel daran erinnern, dass sie den Preis für eine Gesellschaft zahlen, in der Ungleichheit herrscht.

JON FOSTER / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018

PALÄO-ANTHROPOLOGIE
DIE WAHRE STEINZEITDIÄT

Mikroskopisch kleine Abnutzungsspuren auf fossilen Zähnen verraten, was Frühmenschen gegessen haben. Sie vermitteln damit gleichzeitig einen Eindruck, wie Klimaveränderungen unsere Evolution beeinflussten.



Peter S. Ungar ist Anthropologe an der University of Arkansas in Fayetteville (USA). Sein Forschungsinteresse richtet sich auf die Ernährung derzeitiger und fossiler Primaten einschließlich der Vorfahren des Menschen.

spektrum.de/artikel/1679044



JON FOSTER / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018

Homo erectus **ernährte sich vielseitig. Neben pflanzlicher Kost stand auch Fleisch auf seinem Speiseplan.**

AUF EINEN BLICK
URZEITLICHES MENÜ

1 Aus Größe und Form von Zähnen lässt sich die Ernährung ausgestorbener Tierarten bestimmen. Wichtiger als die Anatomie ist jedoch die Verfügbarkeit von Nahrung.

2 Analysen der mikroskopischen Abnutzungsmuster auf Zähnen zeigen genauer, was ein Individuum einst verspeist hat. Damit können Paläontologen auch den Speiseplan ausgestorbener Homininen rekonstruieren.

3 Erkenntnisse über die Ernährung sowie paläoökologische Befunde zeigen, wie Klimaveränderungen die Evolution des Menschen prägten.

An einem späten Abend des Jahres 1990 saß ich in meiner Hütte am Ufer des Flusses Alas in der Forschungsstation Ketambe des indonesischen Nationalparks Gunung Leuser. Im Schein einer Kerosinlampe schrieb ich meine Notizen ins Reine. Ich wollte hier für meine Doktorarbeit herausfinden, was und wie die Klein- und Menschenaffen der Region fressen. Dahinter steckte die Idee, dass solche Beobachtungen zu Größe, Form und Abnutzungsspuren der Zähne passen sollten: Javaneraffen besitzen ein Gebiss mit großen Schneide- und flachen Backenzähnen, das nach hergebrachter Ansicht zum Verzehr von Früchten gebaut ist. Doch die Affen, die ich die letzten vier Tagen gesehen hatte, fraßen anscheinend nur junge Blätter. Damals begriff ich, dass der Zusammenhang zwischen Form und Funktion der Zähne komplizierter ist, als es in den Lehrbüchern steht – die Zähne verraten nicht unbedingt, was ein Tier frisst. Das mag abstrus klingen, aber diese Erkenntnis wirkt sich maßgeblich auf unser Verständnis über die Evolution der Tiere einschließlich uns Menschen aus.

Als Paläontologe verdiene ich meinen Lebensunterhalt damit, das Verhalten ausgestorbener Arten anhand ihrer fossilen Überreste zu rekonstruieren. Insbesondere interessiert mich, wie sich Tiere früher ihre Nahrung beschafft haben und wie sich dabei Umweltveränderungen auswirkten. Das Jahr in Ketambe prägte mein Denken über Primaten und ihre Lebensgemeinschaften. Ich erkannte die Biosphäre unseres Planeten als reich gedeckten Tisch. Die Tiere stehen gewissermaßen mit dem Teller in der Hand am Büfett und wählen aus dem Angebot, das jeweils zur Verfügung steht. Die Wahl definiert, welchen Platz jede Spezies in der Natur einnimmt.

Das Angebot auf dem Biosphärenbüfett wandelt sich mit den Jahreszeiten

Zähne spielen für die Nahrungswahl eine Schlüsselrolle – schließlich braucht man das richtige Werkzeug. In Ketambe wurde mir allerdings klar, dass es noch etwas viel Wichtigeres gibt: Verfügbarkeit. Die Javaneraffen fraßen Blätter, weil ihnen die Natur zu jener Zeit und an jenem Ort nichts anderes auf dem Biosphärenbüfett serviert hat. Ihr Speiseplan wandelte sich mit den Jahreszeiten, wenn die Blätter sich entfalteten, die Blüten aufbrachen und die Früchte heranreiften. Ich malte mir aus, wie sich veränderte Nahrungsverfügbarkeit im Lauf von Jahrhunderten, Jahrtausenden oder noch längeren Zeiträumen darauf auswirkt, was eine Spezies frisst.

Die meisten Paläontologen sind es nicht gewohnt, so über das Leben der Vergangenheit nachzudenken. Traditionell leitet man in unserem Fachgebiet die Funktion aus der Form ab: Die Natur habe für jede Aufgabe, vor der ein Lebewesen steht, mittels Selektion die besten Hilfsmittel hervorgebracht. Wenn die Form jedoch immer der Funktion folgte, würden Javaneraffen keine Blätter verspeisen. Wie aber können wir an Fossilien ablesen, was ein Tier tatsächlich gefressen hat?

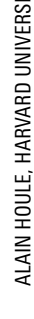
Um genau diese Frage zu beantworten, habe ich jahrzehntelang mikroskopisch kleine Abnutzungsmuster an fossilen Zähnen von zahlreichen Arten einschließlich mehrerer Vor- und Frühmenschenspezies analysiert. Andere Wissenschaftler suchten bei fossilen Zähnen nach chemischen Spuren der Nahrung. Zusammen mit Erkenntnissen über urzeitliche Umweltverhältnisse liefern uns solche Analysen ein viel stimmigeres Bild von der Vergangenheit als die Form eines Zahns allein. Damit nähern wir uns auch einer Antwort auf die Frage, warum unser Zweig des Menschenstammbaums überlebte, während die anderen untergingen.

Wissenschaftler haben zahlreiche Tierarten beobachtet, die nicht nur die Nahrung fressen, an die sie angepasst sind, sondern auch andere. Während ich in Ketambe war, erforschte Melissa Remis, heute an der Purdue University, die Gorillas von Bai Hokou im Regenwald des Dzanga-Nodoki-Nationalparks in der Zentralafrikanischen Republik. Seitdem die berühmte Gorillaforscherin Dian Fossey (1932–1985) in den hoch gelegenen Nebelwäldern der ostafrikanischen Virunga-Vulkane die Affen beobachtet hatte, galten sie als Nahrungsspezialisten, die Stängel, Blätter und Mark von krautigen Pflanzen wie wilden Sellerie verzehren. Das erschien auch plausibel. Gorillas besitzen einen hoch spezialisierten Verdauungsapparat: Ihre scharfkantigen Backenzähne eignen sich hervorragend zum Zermahlen von Pflanzen, und ihr großer Enddarm enthält Mikroorganismen, die beim Verdauen faserreicher Nahrung mithelfen. Außerdem gibt es in dieser Höhe kaum etwas anderes zu fressen.

Die Berggorillas der Virunga-Vulkane bildeten jedoch nur eine kleine, randständige Population aus wenigen hundert Individuen in einem extremen Lebensraum. Wie sah es bei den 200 000 Gorillas aus, die 1600 Kilometer weiter westlich in den tief gelegenen Regenwäldern des Kongobeckens lebten? Offenbar bevorzugten die Westlichen Flachlandgorillas von Bai Hokou weiche, süße Früchte. Remis sah sogar Gorillas, die fast einen Kilometer weit an genießbaren Blättern und Stängeln vorbei zu einem Baum mit Früchten liefen. Auf faserreiche Kost griffen sie wohl nur dann zurück, wenn ihre Lieblingsfrüchte nicht zur Verfügung standen. Allerdings waren die Tiere im Gegensatz zu ihren Verwandten der Virunga-Vulkane sehr scheu, so dass Remis nur wenige von ihnen verfolgen konnte. Einige Wissenschaftler bezweifeln angesichts der Zähne und des Darms, dass Gorillas tatsächlich Früchte bevorzugen.

»Womit füttert man einen 200 Kilogramm schweren Gorilla? – Mit allem, was er will!«, lautet ein alter Witz. Aber woher sollen wir wissen, was ein Gorilla will? Zurückgekehrt von Bai Hokou, ging Remis in den Zoo von San Francisco und fragte die Gorillas selbst: Sie bot den gefangenen Affen verschiedenes Futter an, von süßen Mangos bis zu bitteren Tamarinden, aber auch saure Zitronen und natürlich den zähen Sellerie. Die Gorillas im Zoo bevorzugten eindeutig süße, fleischige Früchte gegenüber der faserreichen Nahrung. Damit bestätigte sich, dass die Tiere zwar durch ihren Verdauungsapparat an mechanisch und chemisch anspruchsvollstes Futter angepasst sind – ihre Lieblingsspeise ist das allerdings nicht. Vielleicht fressen die Gorillas der Virunga-Vulkane also nicht deshalb rund ums Jahr zähe Kost, weil sie diese besonders mögen, sondern weil sie es können und – angesichts des begrenzten Menüs in solchen Höhen – müssen. Tatsächlich greifen Berggorillas in tieferen Lagen ebenfalls lieber zu Früchten, wenn sie zur Verfügung stehen.





Grauwangenmangaben *(Lophocebus albigena)* greifen gern zu weichen Früchten. Ihre flachen Backenzähne mit dickem Zahnschmelz scheinen dagegen auf das Zermalmen harter Nahrung spezialisiert zu sein. Doch diese fressen die Tiere nur, wenn ihnen nichts anderes zur Verfügung steht.

Eine Vorliebe für Nahrung, an die eine Spezies eigentlich nicht angepasst ist, kommt im Tierreich so häufig vor, dass es dafür einen eigenen Begriff gibt: Liems Paradoxon. Der 2009 verstorbene Biologe Karl Liem von der Harvard University stieß in den 1980er Jahren im Norden Mexikos auf ein interessantes Phänomen: Der hier vorkommende Buntbarsch *Herichthys minckleyi* besitzt flache, kieselsteinartige Zähne, die sich hervorragend zum Aufknacken harter Schneckenhäuser eignen. Doch die Süßwasserfische schwimmen an den Schnecken vorüber, wenn es weichere Nahrung gibt. Warum entwickelten sich in der Evolution Zähne, die auf weniger bevorzugtes, selten verzehrtes Futter spezialisiert sind? Solange diese Spezialisierung den Verzehr weicher Nahrung nicht behindert, stehen damit bei Bedarf mehr Möglichkeiten offen. Das Paradoxon besteht also weniger darin, dass ein Tier die Nahrung meidet, an die es angepasst ist, sondern dass eine spezialisierte Anatomie mit einer generalisierten Ernährung einhergehen kann.

Beispiele für Liems Paradoxon liefern auch andere Tiere, darunter die Grauwangenmangaben im Kibale-Nationalpark in Uganda (siehe Foto links). Die Affen besitzen flache Backenzähne mit dickem Zahnschmelz, die anscheinend auf das Zermalmen harter, spröder Nahrung spezialisiert sind. Und dennoch beobachtete Joanna Lambert, die heute an der University of Colorado in Boulder arbeitet, Tag für Tag, Monat für Monat, ja sogar Jahr für Jahr, wie die Mangaben weiche, fleischige Früchte und junge Blätter fraßen – genauso wie die in der gleichen Gegend lebenden Rotschwanzmeerkatzen mit ihren dünnen Zähnen. Doch im Sommer 1997 änderte sich alles: Auf Grund eines El-Niño-Ereignisses litt der Wald unter einer besonders schweren Dürre. Die Früchte wurden knapp, die Blätter verwelkten – und die Affen hungerten. Die Mangaben fraßen nun mehr Rinde und harte Samen, die Meerkatzen aber nicht. Dank ihres spezialisierten Kauapparats konnten Erstere auf mechanisch anspruchsvolleres Futter zurückgreifen. Selbst wenn eine solche Anpassung in einer Generation nur ein- oder zweimal gebraucht wird, kann sie unter Umständen dafür sorgen, dass die Tiere magere Zeiten überstehen.

Verräterische Spuren auf den Zähnen

In anderen Fällen kann eine spezialisierte Anatomie aber durchaus mit Nahrungspräferenzen zusammenfallen. Die Rußmangaben im Taï-Wald der Elfenbeinküste zum Beispiel besitzen einen kräftigen Kiefer sowie dicken Zahnschmelz – und sie mögen tatsächlich harte Kost. Während der Nahrungssuche verwenden sie einen großen Teil ihrer Zeit darauf, am Waldboden nach den pfirsichkernartigen Samen der tropischen Baumgattung *Sacoglottis* zu suchen. Wie Scott McGraw von der Ohio State University vermutet, gehen die Affen damit der Nahrungskonkurrenz mit den zehn anderen Primatenarten aus dem Weg, die hier ebenfalls leben. Demnach setzen manche Mangabenarten ständig auf mechanisch anspruchsvolle Nahrung, andere dagegen eher selten.

Solche Beispiele demonstrieren, dass die Nahrungsauswahl von Primaten nicht nur von den Zähnen abhängt, sondern auch von Verfügbarkeit, Konkurrenzsituation und persönlichen Vorlieben. Die Zahnform kann etwas darüber aussagen, was das Tier in der Vergangenheit fressen konnte und welches die schwierigste Nahrung war, mit der seine Vorfahren zurechtkommen mussten. Aber um zu erfahren, welches Menü aus dem Biosphärenbüfett die Tiere tatsächlich wählten, müssen wir uns die Zähne genauer ansehen.

Je nach Nahrung bilden sich auf den Zahnoberflächen mikroskopisch kleine Kratzer und Rillen. Bei Arten, die ihr Futter zerschneiden oder zerteilen wie Gras fressende Antilopen oder Fleisch fressende Geparde, tauchen lange, parallel verlaufende Kratzer auf, weil die gegenüberstehenden Zähne aneinander entlanggleiten und schleifendes Material mitziehen. Bei anderen, die Hartes zermalmen wie die Nüsse fressenden Mangaben oder die Knochen brechenden Hyänen, sind die Zähne mit kraterförmigen Vertiefungen unterschiedlicher Form und Größe bedeckt.

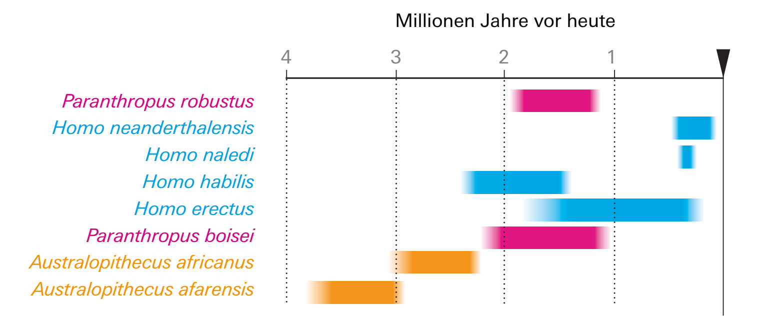
In der Regel werden solche »Foodprints«, wie ich sie nenne, binnen weniger Tage abgeschabt und von neuen überschrieben. Daher können wir etwas über die Vielfalt und vielleicht auch die Mengenverhältnisse der verzehrten Nahrung erfahren, wenn wir die Zähne von verschiedenen

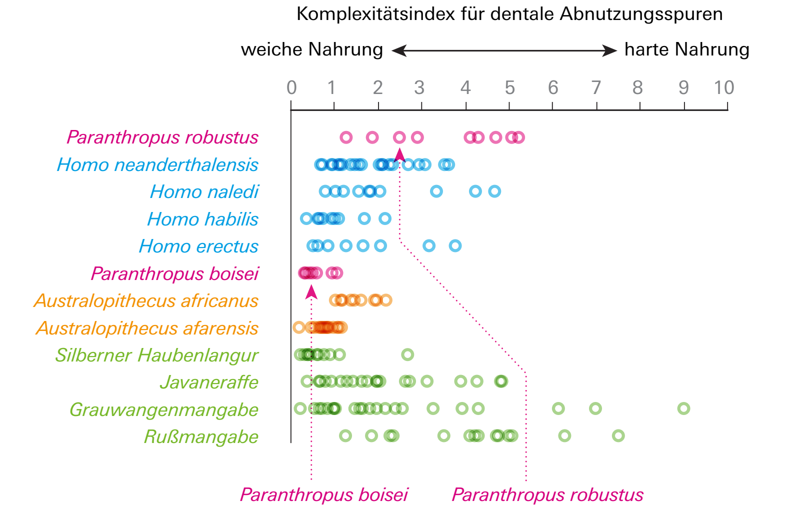
Foodprints

Auf Zähnen bilden sich während des Gebrauchs mikroskopisch kleine Kratzer. Bei Tieren, die zähe Kost wie Gras verzehren, erscheinen solche Abnutzungsspuren als parallele Rillen. Zerkleinert ein Individuum dagegen Nüsse oder anderes hartes, sprödes Material, entstehen kraterförmige Vertiefungen. Die Abnutzungsmuster fossiler Zähne, etwa von *Paranthropus robustus* und *Paranthropus boisei*, erlauben Rückschlüsse auf die Ernährung ausgestorbener Menschenarten.

Grasfresser statt Nussknacker

Auf Grund früherer Untersuchungen der Zahnform galt *P. robustus* als Liebhaber zäher Pflanzenkost, während sich *P. boisei* auf das Knacken von Nüssen spezialisiert haben sollte. Die mikroskopischen Abnutzungsspuren eines Zahns von *P. robustus* zeigten jedoch ein kompliziertes Muster aus Rillen und Vertiefungen, was ihn als Ernährungsgeneralisten verrät (unten rechts). *P. boisei* dagegen trägt nicht die bei einem Nussknacker zu erwartenden Vertiefungen, sondern rillenförmige Kratzer (unten links). Wie spätere chemische Analysen der Zähne belegten, verzehrte diese Spezies vorwiegend Gras.





DATEN UND MIKROSKOP-AUFNAHMEN: PETER S. UNGAR; ZAHNILLUSTRATIONEN MITTE: PORTIA SLOAN ROLLINGS; DIAGRAMME: JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018

Individuen aus unterschiedlichen Zeiten und Orten vergleichen (siehe »Foodprints«, oben). Die mikroskopischen Abnutzungsmuster der Grauwangenmangaben von Kibale ähneln mit ihren zarten Kratzern und kleinen Vertiefungen denen von Affen, die weiche Früchte fressen – bei einigen Exemplaren finden sich aber auch tiefere Gruben. Die Zahnoberfläche der Rußmangaben aus Taï dagegen lassen meist mehr Krater erkennen. Beide Arten besitzen ähnliche Zahnformen, doch erst ihre Foodprints passen zu der bekannten unterschiedlichen Ernährung.

Anhand der mikroskopischen Abnutzungsmuster bei lebenden Tieren, deren Ernährungsgewohnheiten wir unmittelbar beobachten können, lässt sich aus der Abnutzung fossiler Zähne auf den Speiseplan ausgestorbener Arten schließen. Deshalb steckten meine Kollegen und ich viel Arbeit in die Analyse der mikroskopischen Abnutzungsspuren menschlicher Fossilien – mit überraschenden Ergebnissen.

Der Stammbaum des Menschen hat viele Äste. *Homo sapiens* überlebte als einzige Menschenart bis heute; früher teilten sich viele Homininen unseren Planeten. Hierzu zählt etwa die Gattung *Paranthropus*, die im Pleistozän vor rund 1,2 bis 2,7 Millionen Jahren im östlichen und südlichen Afrika existierte. Wir selbst sind aus keiner Spezies dieser Gattung hervorgegangen; vielmehr handelt es sich um letztlich gescheiterte Experimente der Evolution, die neben unseren Vorfahren über die Erde wandelten. *Paranthropus* besaß große, flache Backenzähne mit dickem Zahnschmelz, einen massiven Kiefer sowie charakteristische Knochenleisten und Kerben, die auf eine mächtige Kaumuskulatur schließen lassen. Solche Merkmale deuten klar auf eine spezialisierte Ernährung, die starkes Kauen erfordert; die fraglichen Arten erweisen sich somit als ideale Kandidaten für eine Analyse der mikroskopischen Abnutzung. Wenn wir bei ihnen nicht herausfinden können, was sie einst verspeist haben, dürfte die Ernährung anderer

fossiler Homininen mit einem weniger charakteristischen Kauapparat erst recht unergründlich bleiben.

Bereits 1954 bemühte sich John Robinson (1923–2001) vom Transvaal Museum in Pretoria, die Ernährung von *Paranthropus* zu rekonstruieren. Der Paläoanthropologe glaubte, die südafrikanische Spezies *Paranthropus robustus* habe mit ihren großen, flachen Backenzähnen mit dickem Zahnschmelz zähe Pflanzenteile zermalmt. Die Abnutzungsspuren ließen seiner Ansicht nach darauf schließen, dass *P. robustus* vor allem grobe Wurzeln und Knollen verzehrte. Robinsons Kollege Phillip Tobias (1925–2012) war anderer Meinung: Er führte die Abplatzungen nicht auf zähe, sondern auf besonders harte Lebensmittel zurück. Tobias beschrieb in den 1960er Jahren die Art *Paranthropus boisei*. Als er dessen Schädel zum ersten Mal sah, soll er gesagt haben: »Ich habe noch nie einen derart bemerkenswerten Nussknacker gesehen.«

Ein vermeintlicher Spezialist für harte Kost erweist sich als Nahrungsgeneralist

Damit war die Idee vom Nussknacker-Menschen geboren. *Paranthropus* stand in krassem Gegensatz zu Fossilien des frühen *Homo* aus denselben Sedimenten mit seinen kleineren Zähnen, einem zierlicherem Kiefer, einem größeren Gehirn sowie mit Steinwerkzeugen zum Verarbeiten von Nahrung. Für die Unterschiede lieferten Wissenschaftler eine plausible Erklärung: die Savannenhypothese. Demnach gelangten unsere Vorfahren an einen evolutionären Scheideweg, als sich Graslandschaften über Afrika ausbreiteten. *Paranthropus* schlug die eine Richtung ein und fokussierte sich auf harte, trockene Pflanzenteile aus der Savanne wie Samen und Wurzeln. Der frühe *Homo* ging einen anderen Weg: Er wurde immer vielseitiger, und auf seinen Speiseplan setzte er nun auch Fleisch. Auf Grund dieser flexiblen Ernährung gibt es laut dieser Vorstellung uns noch, während *Paranthropus* verschwand. Die Theorie klang überzeugend. In den 1980er Jahren konnte der Anthropologe Frederick Grine von der Stony Brook University mit ersten mikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass die Zähne von *P. robustus* tatsächlich mehr abnutzungsbedingte Vertiefungen aufweisen als die seines Vorfahren *Australopithecus*. Damit schien bestätigt, dass sich dieser Vetter des Menschen auf harte, spröde Nahrung spezialisiert hatte.

Im Jahr 2005 jedoch, als mein Postdoc Robert Scott und ich uns die mikroskopisch kleinen Abnutzungserscheinungen von *P. robustus* genauer anschauten, kristallisierte sich eine andere Geschichte heraus: Ja, der Abrieb mit mehr Vertiefungen wirkte bei *P. robustus* komplizierter, aber bei manchen Exemplaren tauchten auch weniger eingekerbte Zahnoberflächen auf. Die mikroskopischen Verschleißspuren erwiesen sich somit als sehr vielgestaltig – manche Individuen hatten demnach an den Tagen vor ihrem Tod harte Nahrung zu sich genommen, andere dagegen nicht. Anders gesagt: Die spezialisierte Anatomie von *P. robustus* bedeutete nicht zwangsläufig, dass die Art ein Nahrungsspezialist war. Diese Schlussfolgerung war nicht neu. Bereits ein Jahr zuvor hatten Bernard Wood von der George Washington University und David Strait, der heute an der Washington University in St. Louis arbeitet, auf Grund indirekter Indizien spekuliert, *Paranthropus* könne ein ökologischer Generalist mit flexibler Ernährungsweise gewesen sein. Unsere Arbeiten lieferten dann den unmittelbaren Beleg für Liems Paradoxon bei Homininen.

Eine noch größere Überraschung erlebten wir 2008, als wir uns die Abnutzungsspuren bei *Paranthropus boisei* ansahen – Tobias' Nussknacker, die Spezies mit den größten Zähnen, den massivsten Kieferknochen und dem dicksten Zahnschmelz aller Homininen. Ich hatte damit gerechnet, dass wir auf der Zahnoberfläche geradezu mondartige Kraterlandschaften fänden, so wie sie auch bei Rußmangaben auftauchten. Das erwies sich jedoch als falsch. Ein Zahn nach dem anderen offenbarte lediglich in alle Richtungen verlaufende zarte Kratzer. Diese Kreaturen waren somit keineswegs Spezialisten für harte Kost; es gab überhaupt keine Hinweise auf feste Nahrung. Die Nussknackerhypothese fiel in sich zusammen wie ein Kartenhaus. Was also verspeiste *P. boisei* mit seinen großen, flachen Zähnen? Diese Frage sollte erst mit einer anderen Form von Foodprints beantworten werden: mit Kohlenstoffisotopen.

In den Zähnen bleiben charakteristische chemische Spuren der Nahrung erhalten, die das Rohmaterial zum Aufbau des Körpers liefert. Wie die mikroskopischen Abnutzungsspuren lassen sich diese chemischen Indizien lesen und entschlüsseln. So enthalten tropische Gräser im Vergleich zu Bäumen und Büschen einen höheren Anteil an Kohlenstoffatomen mit sieben statt der üblichen sechs Neutronen; und deshalb findet man in den Zähnen von Tieren, die tropische Gräser fressen, mehr von diesem »schweren« Kohlenstoff.

Das Verhältnis der Kohlenstoffisotope in den Zähnen von *P. robustus* deutet auf eine Ernährung hin, in der Produkte von Bäumen und Büschen die Hauptrolle spielten, wobei aber auch ein kräftiger Anteil von tropischen Gräsern hinzukam. Dieser Befund passt zu einer breit gefächerten Ernährung. *P. boisei* liefert dagegen ein anderes Bild: Hier lassen die Kohlenstoffisotope darauf schließen, dass die Art zu mindestens drei Viertel von Gräsern lebte.

Dieses Ergebnis schockierte viele Paläoanthropologen: ein Hominine, der Gras frisst? Ein Mitglied unseres Familienstammbaums ist doch keine Kuh! Mir erschien das jedoch plausibel. Die Spezies tauchte just zu jener Zeit auf, als sich Graslandschaften im östlichen und südlichen Afrika ausbreiteten, so dass das Biosphärenbüfett nun mit reichlich Wiesen gedeckt war. Wenn *P. boisei* mit seinen großen, flachen Zähnen und den kräftigen Kiefern statt harter, spröder Nahrung Gräser zermalmte, musste genau das Muster mikroskopischer Abnutzungsspuren zurückbleiben,

das meine Kollegen und ich gefunden hatten. Eine solche Ernährung könnte ebenfalls erklären, warum die Backenzähne von *P. boisei* so schnell abgeschliffen wurden.

Das alles wüssten wir nicht, wenn wir lediglich die Form der riesigen, flachen Zähne berücksichtigten; erst die Foodprints offenbarten, dass die beiden Arten von *Paranthropus* ihre spezialisierte Anatomie auf ganz unterschiedliche und unerwartete Weise nutzten. Wie die Mangaben von Kibale scheint *P. robustus* ein Generalist gewesen zu sein, der auch harte Kost nicht verschmähte. Bei *P. boisei* dagegen zeigte sich ein Zusammenhang zwischen Zähnen und Ernährung, der sich von allem unterscheidet, was wir von heutigen Primaten kennen. Große, flache Zähne sind keineswegs ideal zum Zerkleinern von Gras, aber man muss mit dem zurechtkommen, was man hat. Solange ein flacher Mahlstein besser ist als alles, was die Homininen zuvor besaßen, hat die Selektion ihn selbst dann nicht aussortiert, wenn er sich für die fragliche Aufgabe nur suboptimal eignete.



JOHN R. FOSTER / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Kurzfristige Umschwünge des Klimas ließen keinen Platz für wählerische Esser

Bei unseren unmittelbaren Vorfahren aus der Gattung *Homo* weisen die mikroskopischen Abnutzungserscheinungen auf eine andere Ernährungsstrategie hin. Wir beschäftigten uns mit zwei frühen Arten: dem »primitiveren« *Homo habilis*, der ein kleineres Gehirn besaß und einige Eigenschaften vom Leben auf Bäumen beibehalten hatte, sowie *Homo erectus*, einer Spezies mit größerem Gehirn, die sich ausschließlich am Boden aufhielt. Allerdings standen uns lediglich kleine Stichproben zur Verfügung, denn für die Analyse der Abriebspuren braucht man unberührte Zähne, von denen es nicht allzu viele gibt. Doch diese offenbarten interessante Zusammenhänge: Im Vergleich zu seinem mutmaßlichen Vorfahren *Australopithecus afarensis* und zur gleichzeitig existierenden Art *P. boisei* zeigte *H. habilis* ein größeres Spektrum an Abnutzungsformen, die von Oberflächen mit komplizierten Gruben bis zu einfachen Kratzern reichen. Demnach scheint das Menü von *H. habilis* abwechslungsreicher als das seiner Vorfahren und Zeitgenossen gewesen zu sein. Bei seinem Nachfolger *H. erectus* sind die Spuren sogar noch vielfältiger, was auf eine abermals breiter gefächerte Ernährungsweise hindeutet.

Solche Befunde passen sehr gut zur heutigen Vorstellung über die Einflüsse von Klimaveränderungen auf die Evolution des Menschen. Als der britische Geologe Nicholas Shackleton (1937–2006) Mitte der 1990er Jahre Klimadaten anhand von Tiefseebohrkernen analysierte, erwies sich die bisherige Savannenhypothese als zu simpel. Langfristig wurde das Klima kühler und trockener, es gab aber auch kurzfristige Umschwünge, die im Lauf der Menschenevolution immer heftiger ausfielen.

Ein derart instabiles Klima kann nach Ansicht des Paläoanthropologen Rick Potts von der Smithsonian Institution vielseitigere Arten begünstigen – eine Vorstellung, die als Hypothese der Variabilitätsselektion bekannt wurde. Afrika bot im Pleistozän keinen Platz für wählerische Esser. In Potts' Augen trieb weniger die Ausbreitung der Grassavannen als vielmehr die Notwendigkeit zur Flexibilität die Evolution des Menschen voran. Unter solchen Gesichtspunkten erscheinen das größere Gehirn von *Homo* sowie die Steinwerkzeuge, mit denen er verschiedenste Nahrungsmittel verarbeiten konnte, durchaus sinnvoll. Damit wären unsere Vorfahren in der Lage gewesen, immer heftigere Umschwünge der Umweltbedingungen zu überleben und auch dann noch zurechtzukommen, als die Natur das Angebot auf dem Biosphärenbüfett immer rascher austauschte. Die zunehmenden Variationen der mikroskopischen Abnutzungserscheinungen bei den Zähnen von *A. afarensis* über *H. habilis* bis zu *H. erectus* wären somit ein unmittelbarer Beleg für die Variabilitätsselektion.

Auf Potts' Idee, vor zwei Jahrzehnten zum ersten Mal formuliert, bauten andere Wissenschaftler auf, und heute wissen wir mehr darüber, wie sich wandelnde Landschaften der Erde auf die Evolution des Menschen auswirkten. So gehen Mark Maslin vom University College London und Martin Trauth von der Universität Potsdam davon aus, dass sich die im Ostafrikanischen Grabenbruch entstehenden Seen durch Klimaveränderungen auffüllten und wieder leerten, was das dortige Leben maßgeblich beeinträchtigte. Solche Fluktuationen dürften die Homininenpopulation immer wieder auseinandergerissen und damit die Evolution des Menschen gefördert haben. Die Fähigkeit, einen vielseitigen Speiseplan zu nutzen, hätte das Überleben in derart turbulenten Zeiten gesichert.

Anhand der verfügbaren Indizien können Wissenschaftler zwar ein stimmiges Bild davon zeichnen, wie sich die frühen Homininen an ihre veränderliche Umwelt angepasst haben, allerdings nur mit groben Pinselstrichen. Will man verstehen, wie ein Klimawandel die Evolution vorantreibt, gilt es, bestimmte Klimaereignisse mit den Fossilfunden in Einklang zu bringen.

Die lokale Umwelt reagiert auf globale oder auch regionale Klimaveränderungen sehr unterschiedlich, und unsere Fossilfunde sind einfach zu spärlich, um genau festzustellen, wo und wann bestimmte Arten auftauchten und wieder ver-



JOHN R. FOSTER / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Während sich *Paranthropus boisei* (links) trotz seines kräftigen Kiefers überraschenderweise als Grasfresser entpuppte, besaß sein Zeitgenosse *Homo habilis* (rechts) einen vielseitigeren Speiseplan. Die Flexibilität bei der Ernährung dürfte ein Schlüssel für den evolutionären Erfolg der Gattung *Homo* gewesen sein.

schwanden. Wir können dabei um 1000 Kilometer oder 100000 Jahre danebenliegen. Zwar lässt sich mitunter das Aussterben einer Tiergruppe mit einem großen, katastrophalen Ereignis der Erdgeschichte verbinden, so wie mit dem Asteroideneinschlag auf der Halbinsel Yukatan, der vor 66 Millionen Jahren die Herrschaft der Dinosaurier beendete. Aber die während der Entwicklung des Menschen aufgetretenen Klimaereignisse sind damit nicht vergleichbar – hier wechselten sich Zyklen kühltrockener mit feuchtwarmen Bedingungen immer wieder ab. Um zu verstehen, wie die Homininen auf eine wechselnde Umwelt reagierten, müssen wir deshalb auf besonders gut untersuchte Stellen aus der jüngeren Vergangenheit zurückgreifen.

Neandertaler mit flexiblem Speiseplan

Wie ein solcher Ansatz funktioniert, zeigen Studien an mikroskopischen Abnutzungsspuren bei Neandertalern, die Sireen El Zaatari von der Universität Tübingen sowie Kristin Krueger von der Loyola University Chicago analysierten. Neandertaler besaßen in Europa und Westasien von vor 400000 bis vor rund 40000 Jahren die Vorherrschaft. Dann verschwanden sie, und der anatomisch moderne Mensch breitete sich aus. Paläoanthropologen rätseln bis heute, was damals geschah.

Das häufig noch kolportierte Bild des brutalen Neandertalers, der sich unter eiszeitlichen Bedingungen in Tierfelle hüllte und gierig das Fleisch von Mammuts und Wollnashörnern verschlang, trügt. Vielmehr bewohnten Neandertaler verschiedenste Lebensräume, von kalten, trockenen Steppen bis zu wärmeren, feuchteren Waldlandschaften, unter je nach Ort und Zeit wechselnden Bedingungen. Die komplexen Abnutzungsmuster ihrer Backenzähne verraten uns, dass sie in eher bewaldeten Gegenden härtere, sprödere und stärker scheuernde vegetarische Kost zu sich nahmen. Dagegen besaßen Neandertaler, die in offenen Steppen lebten, weniger kompliziert abgenutzte Zähne, was nach Ansicht von El Zaatari und ihren Kollegen eine einseitigere Ernährung vorwiegend aus weichem Fleisch widerspiegelt. Krueger hingegen stieß bei Neandertalern auf unterschiedlich abgewetzte Schneidezähne – vermutlich weil die Steppenbewohner damit Tierfelle mit ihren eigenen Zähnen bearbeiteten, während ihre Artgenossen im Wald ein breiteres Spektrum verschiedener Nahrungsmittel verzehrten. Faszinierenderweise gelten diese Unterschiede sowohl für frühere wie für spätere Neandertaler. Demnach besaßen sie einen flexiblen Speiseplan und ernährten sich so, wie es ihrem Lebensraum und der dort verfügbaren Nahrung entsprach.

Ganz anders sieht das Muster beim anatomisch modernen Menschen aus, der während der letzten Eiszeit nach Europa vordrang. Hier gibt es kaum unterschiedliche Abnutzungsspuren der Backenzähne zwischen Bewohnern von offenen und von eher bewaldeten Lebensräumen – egal ob man Individuen aus früherer oder späterer Zeit betrachtet. Vielleicht war *Homo sapiens* besser als der Neandertaler in der Lage, sich die bevorzugte Nahrung zu verschaffen, wenn sich die Umweltbedingungen veränderten.

Aus den Studien über Frühmenschen lassen sich auch Tipps für eine heutige gesunde Ernährung herleiten – aber wohl nicht ganz so, wie das oft geschieht. Verfechter der »Steinzeitdiät« mahnen, wir sollten das essen, was sich bei unseren Vorfahren in der Evolution bewährt habe. Sie erklären chronische Volksleiden mit einem Missverhältnis zwischen unserer Ernährung und dem Bedarf, für den unser Organismus »konstruiert« worden ist.

Sicherlich schadet es nicht, wenn wir hin und wieder daran denken, dass unsere Vorfahren weder Würstchen mit Pommes noch Cola zu sich nahmen. Das heißt jedoch nicht, dass wir einer besonderen Steinzeitkost hinterherjagen sollten. Aus den Foodprints wissen wir, dass sich die frühen Homininen je nach Ort und Zeit sehr unterschiedlich ernährten und dass die ständigen Wandlungen von Klima, Lebensraum und verfügbaren Nahrungsmitteln uns zu flexiblen Essern machten. Mit anderen Worten: Es gab gar keine einheitliche Ernährung, der wir nacheifern könnten. Gerade wegen ihrer vielseitigen Kost konnten sich unsere Vorfahren über die ganze Erde ausbreiten und fanden auf den unzähligen Biosphärenbüfetts immer etwas zu essen. Das war der Schlüssel unseres Erfolgs. ◂

QUELLEN

El Zaatari, S. et al.: Neandertal versus modern human dietary responses to climatic fluctuations. PLoS One 11, e0153277, 2016

Krueger, K.L. et al.: Anterior dental microwear textures show habitat-driven variability in Neandertal behavior. Journal of Human Evolution 105, 2017

Ungar, P.S. et al.: Dental microwear and diet of the Plio-Pleistocene hominin *Paranthropus boisei*. PLoS One 3, e2044, 2008

Ungar, P.S., Sponheimer, M.: The diets of early hominins. Science 334, 2011



EVOLUTION

UMZUG IN DIE STADT

Wie sich die Natur auf uns Menschen einstellt, ohne dass wir es sofort merken.

Menno Schilthuizen ist leitender Wissenschaftler am Naturalis Biodiversity Center in den Niederlanden und Professor für Evolutionsbiologie an der Universität Leiden.

spektrum.de/artikel/1681130

GRAFXART8888 / GETTY IMAGES / ISTOCK


Die flächendeckende Bodenversiegelung in Metropolen stellt Pflanzen vor große Probleme. Dennoch sprießen sie selbst durch engste Spalten.

GRAFXART8888 / GETTY IMAGES / ISTOCK

»Wusch!«, ruft mein Freund Frank, während er die hohle Hand nach oben schnellen lässt und dabei fast das Glas auf dem Tisch umwirft. Wir sitzen im Hinterhof meines Hauses im niederländischen Leiden. Frank zeigt mir gerade, wie es aussieht, wenn ein Wanderfalke vor dem Fenster seines Arbeitszimmers aufwärtsschießt. Das passiert ein- bis zweimal täglich, und der Greifvogel hält dabei meist eine frisch erlegte Taube in den Krallen und steuert seinen Horst an, der sich unter einem riesigen beleuchteten Logo auf dem Hausdach befindet. Wenige Sekunden nach einem solchen Vorbeiflug schweben ein paar ausgerupfte Federn herunter.

Die Wanderfalken gehören zu den vielen Vogelarten, die sich in jüngster Zeit an ein Leben in der Stadt angepasst haben. Unter natürlichen Bedingungen jagen sie mittelgroße Vögel in der Umgebung felsiger Klippen. Doch seit der Mensch nahezu überall künstliche Landschaften aus Kirchen, Schornsteinen, Bürohäusern und sonstigen Gebäuden errichtet hat, tauschen die Vögel nur zu gern steile Böschungen gegen Fassaden und erlegen Tauben statt Hähern. In einigen Regionen Europas und Nordamerikas nistet bereits heute die Mehrzahl der Wanderfalken in Städten.

Ähnlichkeiten zwischen urbaner und natürlicher Umwelt locken immer mehr Tiere und Pflanzen in menschliche Siedlungen. Höhlenschaben halten sich auf Grund ihrer evolutionär erworbenen Standortpräferenzen gern in dunklen, feuchten Wohnungen auf. Strandpflanzen gedeihen entlang von Straßen, auf denen im Winter Salz gestreut wird. Waschbären stellen fest, dass sie mit ihren geschickten, handähnlichen Vorderpfoten wunderbar in Abfall- und Komposthaufen wühlen können, die nahezu überall zu finden sind. Denn *Homo sapiens* nimmt auf fast allen Kontinenten ausgedehnte Regionen in Beschlag: 2030 wird es mehr als 600 Städte geben, in denen jeweils mehr als eine Million Menschen leben. Keine Spezies außer uns hat jemals in derart gewaltigem Maßstab neue Umwelten erschaffen, in denen nicht bloß wir selbst, sondern auch andere Arten leben.

Städte mit ihren Landschaften aus Stein, Glas und Stahl, mit ihrem rasenden Puls der Autostraßen und Schienenwege, ihrem gleißenden künstlichen Licht und ihren chemi-

AUF EINEN BLICK
EXTREMER LEBENSRAUM

1. Zahlreiche Pflanzen- und Tierarten zeigen überraschende Anpassungen an das Leben in der Stadt.
2. Offenbar schreitet die Evolution in urbanen Gebieten deutlich schneller voran als in naturnahen Umgebungen.
3. Da in städtischen Ökosystemen weltweit vergleichbare Selektionsdrücke wirken, dürften sich die dort siedelnden Arten allmählich immer ähnlicher werden.


IOANNA_ALEXA / GETTY IMAGES / ISTOCK

Im urbanen Umfeld verändert sich die Form von Löwenzahnsamen so, dass sie schneller zu Boden fallen und somit näher an der Elternpflanze landen. Das erhöht die Chance, unversiegelten Boden zu treffen.

schen Ausdünstungen sind extreme, aber auch üppige Lebensräume. Obwohl die Bedingungen hier oft hart sind, weisen sie dennoch viele Vorteile auf, insbesondere die massenhafte Verfügbarkeit von Nahrung und anderen Ressourcen, die der Mensch anhäuft. So wie in natürlichen Umgebungen, die sich durch extreme Merkmale auszeichnen – Wüsten, Schwefelquellen oder tiefe Höhlen –, treibt die Kombination aus Chancen und Risiken ebenso im urbanen Umfeld die Evolution voran. Meine Kollegen rund um den Globus und ich stellen immer wieder fest, dass Städte zu brodelnden Laboren der Evolution geworden sind: zu Habitaten, die nach schnellen und umfassenden Anpassungen verlangen.

Um Zeuge dessen zu werden, braucht man nur vor die eigene Tür zu treten. Der Hinterhof meines Hauses gibt ein gutes Beispiel hierfür ab, auch wenn er nicht gerade eine Augenweide ist. Zwischen alten Bodenfliesen wachsen alle möglichen Unkräuter. In einer Ecke wuchert ein vernachlässigter Rosenstrauch, in einer anderen steht ein Blumenkübel mit einer Hortensie. An der Mauer klettern Hopfenranken empor.

Hinter den Blättern des Hopfens verbirgt sich eines meiner Lieblingsbeispiele für urbane Evolution. Vorsichtig ziehe ich sie zur Seite und zeige Frank ein paar Hain-Bänderschnecken, die an den toten Zweigen aus früheren Jahren knabbern. Die Tiere mit der wissenschaftlichen Artbezeichnung *Cepaea nemoralis* sind in Europa heimisch, aber zudem nach Nordamerika verschleppt worden. Ihre Gehäuse können die verschiedensten Farben und Muster annehmen – Varianten, die auf individuell unterschiedlichen Erbfaktoren in der DNA beruhen. Die Schnecken in meinem Hof sind blassgelb und mit bis zu fünf schwarzen, spiralförmigen Streifen verziert.

Warum gerade gelb? Die Antwort hat mit dem so genannten Wärmeinseleffekt zu tun. In Städten liegen die Temperaturen meist höher als in den umgebenden ländlichen Gebieten, weil Gebäude und Straßen die Sonnenstrahlung absorbieren und sich infolgedessen aufheizen. Dies zusammen mit der Wärme, die Millionen Menschen nebst ihren Geräten und Maschinen erzeugen, schafft eine große Blase aus heißer Luft. In einer Gemeinde mittlerer Größe, etwa Leiden, klettern die Thermometerwerte im Stadtzentrum durchschnittlich zwei bis drei Grad Celsius höher als im Umland. In Metropolen wie New York oder Tokio kann der Unterschied mehr als zehn Grad betragen. Für Schnecken, die während des Sommers manchmal wochenlange Trockenphasen überstehen müssen, ist die zusätzliche Wärme potenziell tödlich – besonders wenn sie ein dunkles Gehäuse besitzen, das viel Strahlung absorbiert. Die natürliche Selektion in einem urbanen Umfeld begünstigt deshalb solche Tiere, die ein helleres Haus ausbilden. Außerhalb der Stadtgrenzen stößt man mit größerer Wahrscheinlichkeit auf rote oder braune Schneckenhäuser.

Als Frank und ich durch das Hoftor gehen und auf die Straße treten, stolpern wir über ein zweites Beispiel städtischer Evolution: Löwenzahn *(Taraxacum sect. Ruderalia)*. Die Pflanzen sprießen durch Risse im Straßenpflaster. Einige stehen in voller gelber Blüte, andere tragen eine flauschige Pusteblume mit schirmchenähnlichen Samen. Unter natürlichen Bedingungen werden diese mit dem Wind davongetragen, bis sie in großer Entfernung niedergehen und keimen. Ein System, das Konkurrenz zwischen Elternpflanzen und ihren Nachkommen weitgehend verhindert.

Lieber möglichst steil zu Boden statt vom Winde verweht

In der Stadt funktioniert die Methode jedoch oft nicht, weil das Areal, auf dem die Elternpflanze gedeiht, häufig das einzige unversiegelte Stück Land in der Umgebung ist. Leichte Samen mit Flugschirmen, die der Wind weit wegbläst, landen wahrscheinlich auf Asphalt oder Beton. Besser wäre ein schwerer Samen, der möglichst nah bei der Ursprungspflanze niedergeht. Genau das hat die Agrarwissenschaftlerin Arathi Seshadri von der Colorado State University im Jahr 2012 beobachtet. Wie sie herausfand, sind die beschirmten Löwenzahnsamen in der Stadt deutlich länger und sinken schneller zu Boden als ihre Gegenstücke in ländlichen Regionen.

Interessanterweise hat das Gewöhnliche Ferkelkraut *(Hypochaeris radicata)*, das mit dem Löwenzahn verwandt ist, ganz ähnliche Anpassungen unter natürlichen Bedingungen entwickelt. Auf winzigen Inseln vor der kanadischen Westküste bildet es Samen aus, die schneller zu Boden fallen als die seiner Verwandten auf dem Festland. Hier übte die Gefahr, aufs Meer abgetrieben zu werden, einen entsprechenden Selektionsdruck aus.

Frank und ich setzen unsere Exkursion fort, überqueren eine Hauptstraße und nähern uns einem Flussabschnitt namens Galgewater. Am Ufer, wo einst Rembrandts Ge-

burtshaus stand, liegen mehrere Hausboote. Als wir eine Hängebrücke passieren möchten, fallen uns überall Spinnennetze auf – sowohl zwischen den Holmen des Brückengeländers als auch vor den Fenstern der Boote. Die runden Gebilde, die in der Sonne glitzern, besitzen alle möglichen Größen zwischen Untertassen- und Fahrradreifenformat. An ihren filigranen Fäden hängen die ausgesaugten, vertrockneten Überreste von Mücken und Faltern.

Die Netzbauer selbst, die Brückenkreuzspinnen *(Larinioides sclopetarius)*, sind nirgends zu sehen. Als nachtaktive Tiere verstecken sie sich tagsüber in Ritzen und warten auf die Dunkelheit, bevor sie sich zu ihren gewebten Fallen wagen, um die darin hängen gebliebenen Insekten zu verzehren. Doch was ist mit jenen Netzen direkt unter hellen Brückenlaternen? Hier hat eine städtische Spinnenpopulation neue Baugewohnheiten entwickelt, weil das große Vorteile mit sich bringt: Die Lampen locken zahlreiche Beutetiere an. Wie die österreichische Spinnenforscherin Astrid Heiling schon in den 1990er Jahren herausfand, haben Brückenkreuzspinnen in urbanem Umfeld eine Vorliebe für künstliches Licht ausgeprägt. Sonnenlicht meiden sie allerdings nach wie vor.

Bei den Beutetieren der Spinnen hingegen verläuft die Evolution genau in umgekehrter Richtung – jedenfalls wissen die Forscher das von mindestens einer Spezies. Für Insekten haben die Verlockungen elektrischer Beleuchtung häufig tödliche Folgen. Sie verschmoren an heißem Glas, umkreisen die Lichtquelle bis zur Erschöpfung, statt zu fressen oder sich zu paaren, oder verenden eben im Netz einer Brückenkreuzspinne. Nach Ansicht vieler Entomologen ist die Orientierung zum Hellen hin derart fest im Gehirn der Insekten verdrahtet, dass sie sich nicht abschalten lässt, selbst wenn sie den Verlust unzähliger Individuen zur Folge hat.

Der Schweizer Insektenforscher Florian Altermatt war von dieser Auffassung allerdings nicht überzeugt und führte Studien unter anderem an Pfaffenhütchen-Gespinstmotten *(Yponomeuta cagnagella)* durch. Zunächst sammelte er Hunderte ihrer Raupen im gut beleuchteten Zentrum von Basel und dann noch einmal ebenso viele in den dunklen Wäldern außerhalb der Stadt. Sie alle brachte er in eine Laborumgebung, wo sie sich verpuppten. Die Falter, die daraus hervorgingen, markierte er mit kleinen Farbflecken, so dass er bei jedem erkennen konnte, woher dieser stammte. Dann ließ er mehr als 1000 dieser Motten in einem großen, dunklen Raum frei, an dessen einem Ende sich eine Leuchtstoffröhre befand. Die Falter, die vom Land stammten, flatterten erwartungsgemäß ins Helle – die aus



Brückenkreuzspinnen, welche normalerweise das Licht meiden, bauen ihre Netze direkt unter Straßenlaternen.

OLJASIMOVIC / GETTY IMAGES / ISTOCK


FOTOLIA / HLPHOTO

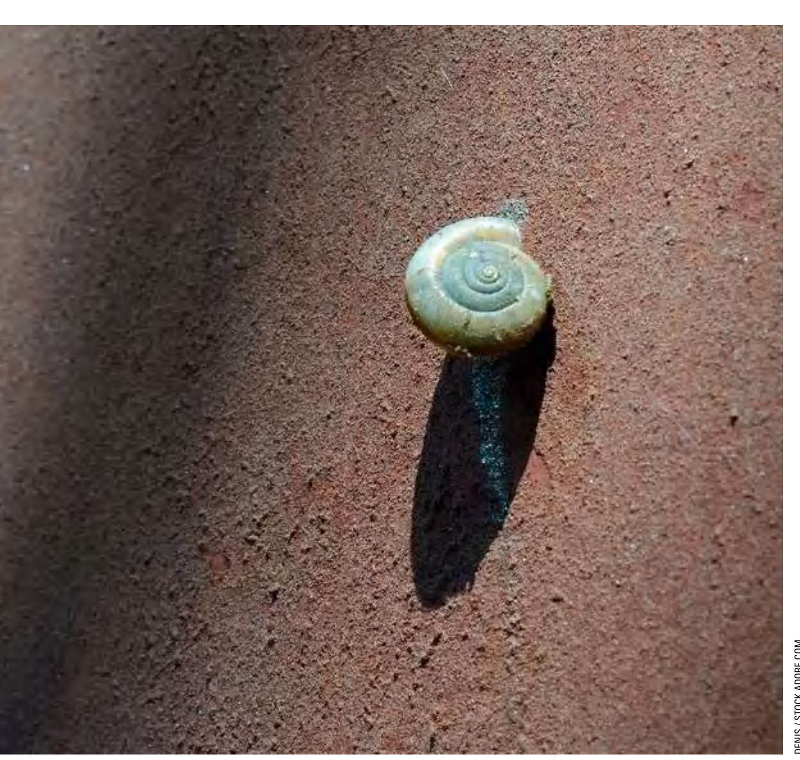
Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/evolution**

der Stadt jedoch ignorierten die Lampe vielfach und hielten sich an anderen Stellen des Raums auf. Offenbar, so folgerte Altermatt, hatten die städtischen Tiere eine gewisse Resistenz gegenüber künstlichem Licht erworben.

Was Frank und ich während unseres kurzen Spaziergangs beobachtet haben, steht beispielhaft für evolutionäre Prozesse, die sich in urbanen Ökosystemen auf der ganzen Welt vollziehen. Ob Wärmeinseleffekt, versiegelte Oberflächen oder Lichtstress; ob Lärm, chemische Verschmutzung oder die Gefahren des Autoverkehrs: In einer städtischen Umgebung steht das Leben vor ganz besonderen Herausforderungen. Biologen haben schon oft beobachten können, wie sich Organismen an solche Faktoren anpassen. Dabei zeigen sich mitunter verblüffende Effekte, insbesondere im Hinblick auf starke Verschmutzungen mit Umweltgiften. Andrew Whitehead von der University of California in Davis und seine Kollegen haben feststellt, dass einige Populationen der »mummichogs« – kleiner Brackwasserfische der Spezies *Fundulus heteroclitus*, die vor der US-Ostküste leben – eine phänomenale Toleranz gegenüber toxischen Chlorverbindungen namens polychlorierte Biphenyle (PCB) ausgebildet haben. Die Tiere vertragen PCB-Konzentrationen, die 8000-mal höher sind als jene, die für Individuen dieser Art normalerweise tödlich wirken.

Hain-Bänderschnecken, die in Städten leben, prägen hellere Gehäuse aus als ihre ländlichen Artgenossen. Auf diese Weise überstehen sie Wärmephasen besser.


DENIS / STOCK.ADOBE.COM

Vielleicht noch wichtiger als physikalische und chemische Faktoren sind biologische Vorgänge. Pflanzliche oder tierische Stadtbewohner leben dicht an dicht mit diversen fremden Arten, die zufällig oder absichtlich eingeschleppt wurden: Ziergewächse, Unkräuter, landwirtschaftliche Nutzpflanzen und Fraßschädlinge, Haustiere, Parasiten und etliche andere Organismen, die Menschen oft unwissentlich in ihren Kleidern und Fahrzeugen mit sich tragen. Zusammen bilden diese Lebewesen ein Ökosystem aus Spezies, die wohl oder übel zusammenleben müssen, obwohl sie nie die Chance hatten, sich einander anzupassen. Das schafft die Bühne für das Entstehen neuer Eigenschaften. Exotische Sittiche beispielsweise stellen ihre Ernährung auf die Samen einheimischer Pflanzen um, während endemische Stadtvögel immun werden gegen Parasiten aus fernen Ländern.

Evolution im Turbogang

Angesichts der vielen Chancen und Herausforderungen evolvieren städtische Tier- und Pflanzenpopulationen sehr schnell. Oft erwerben sie weit reichende Anpassungen binnen weniger Jahrzehnte oder manchmal auch nur Jahre. Die PCB-Toleranz der »mummichogs« etwa entstand in nur wenigen dutzend Fischgenerationen – das dürfte dem maximal möglichen Evolutionstempo bereits ziemlich nah kommen, wie Computermodelle vermuten lassen.

Viele Forscher können kaum glauben, dass eine so rasche Entwicklung wirklich stattfindet. Darwin selbst schrieb dazu: »Von diesen langsamen, stetigen Veränderungen bemerken wir erst dann etwas, wenn der Zeiger der Zeit das Vergehen ganzer Epochen anzeigt.« Tatsächlich aber kann Evolution unter starken Selektionsdrücken viel schneller ablaufen, als Darwin es für möglich hielt. Das gilt insbesondere für Lebewesen, die sich in kurzen zeitlichen Abständen – etwa mehrmals pro Jahr – fortpflanzen. In einer Metaanalyse von mehr als 1600 Fallstudien fanden Forscher um Marina Alberti von der University of Washington eindeutige Hinweise darauf, dass Urbanisierung die Evolution beschleunigt, in manchen Fällen auf das doppelte Tempo. Eine der stärksten Triebkräfte dabei war die Einwanderung invasiver Arten.

Heißt das nun, im Zuge der Urbanisierung werden sich sämtliche Arten einfach an die menschlich geprägten Lebensräume des Anthropozäns anpassen? Leider nein. Nur ganz bestimmte Spezies können Städte besiedeln, dort überleben und gedeihen. Auf jede Art, die hierbei Erfolg hat, kommen mindestens zehn andere, die sich nicht schnell genug anpassen können und deshalb aussterben. Auch in Zukunft werden wir viele Rückzugs- und Naturschutzgebiete, Schutzgesetze und andere Maßnahmen benötigen, die es Organismen ermöglichen, in einer sich verstädternden Landschaft zu überleben.

Nichtsdestoweniger treten wir mit den urbanen Ökosystemen, die sich rund um den Globus ausbreiten, in eine

HUNTERBLISS / STOCK.ADOBE.COM



Stadttauben zeigen oft wenig Scheu. Die zahlreicher werdenden städtischen Wanderfalken könnten ihnen künftig jedoch gefährlich werden.

spannende neue Phase der Erdgeschichte ein. Nie zuvor war ein extremer Lebensraum in derartigem Ausmaß weltweit präsent. Alle Städte ähneln sich in einer Reihe von Merkmalen, und deshalb wird die Pflanzen- und Tierwelt sich überall auch in ähnlicher Weise darauf einstellen. Vielleicht können Amateurforscher den Profis dabei helfen, Ausmaß und Tempo dieses Wandels zu dokumentieren. Viele urban siedelnde Arten, darunter die Stadttaube, der Weißklee und der Löwenzahn, kommen rund um den Globus vor; eine globale Gemeinschaft von Bürgerwissenschaftlern (»Citizen Scientists«) könnte ihre Veränderungen wirksam überwachen. Beispielhafte Erfolgsgeschichten hierfür gibt es schon: Die eingangs beschriebene Evolution der Hain-Bänderschnecken haben Freiwillige mit Hilfe der Smartphone-App SnailSnap entdeckt, die es erlaubte, Daten von als 12000 Schnecken in niederländischen Städten zu sammeln.

Urbane Arten, die sich an vergleichbare städtische Habitate anpassen, könnten einander immer ähnlicher werden, weil sie auf die Herausforderungen der urbanen Umwelt mit denselben adaptiven Strategien antworten. Globale Vereinheitlichung ist daher vielleicht jenes Merkmal, das die städtische Evolution am stärksten von ihrem »natürlichen« Gegenstück unterscheidet und das zum charakteristischen Kennzeichen des Anthropozäns avanciert. Weil es so etwas noch nie gegeben hat, können wir freilich nur mutmaßen, wie es auf diesem Feld künftig weitergehen wird. ◂

QUELLEN

Gaynor, K.M. et al.: The influence of human disturbance on wildlife nocturnality. Science 360, 2018

Markovchick-Nicholls, L. et al.: Relationships between human disturbance and wildlife land use in urban habitat fragments. Conservation Biology 22, 2008

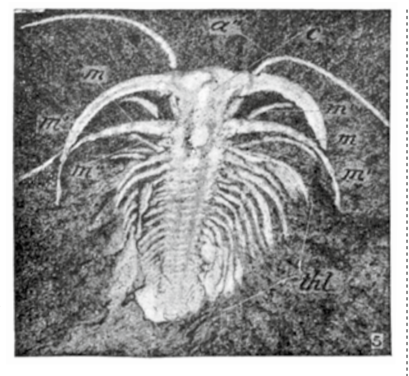
Tablado, Z., Jenni, L.: Determinants of uncertainty in wildlife responses to human disturbance. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society 92, 2017

LITERATURTIPP

Schilthuizen, M.: Darwin in der Stadt – Die rasante Evolution der Tiere im Großstadtdschungel. DTV, 2018

In städtischem Umfeld legen Tiere oft ihre ererbten Verhaltensweisen ab, wie dieses Buch zeigt.

1919


Gut erhalten: Marella, ein Vertreter der höheren Krebse.

30 MILLIONEN JAHRE VOR UNSERER ZEIT

»In der jüngsten Zeit hat unser Wissen von den ältesten, fossil erhaltenen Lebewesen eine gewaltige Erweiterung erfahren. Charles D. Walcott hat die kambrischen und vorkambrischen Schichten Nordamerikas und die Tiere der ältesten Tiergesellschaften einer Durchsicht unterzogen. [Er] schätzt das Alter auf 30 Millionen Jahre. Von den Krebsen waren die Trilobiten besonders häufig. Neben ihnen gab es aber auch schon Riesenkrebse, Blattfußkrebse, ja sogar schon höhere Krebse.« *Die Umschau 58, S. 848–850*

SONNENSTURM LEGT SCHWEDEN LAHM

»Im magnetischen Observatorium des Physikalischen Instituts in Upsala wurde am 11. August ein starker magnetischer Sturm beobachtet. [Er] stellte böse Verwüstungen an den Sicherungen der Telephon- und Telegraphenlinien im ganzen Lande an und verursachte Zündungen in der Kabeleinführung. Diese magnetischen Stürme [haben] ihre Ursache wahrscheinlich in heftigen Veränderungen an der Sonnenoberfläche.« *Prometheus 1574, S. 104*

LANGLEBIGERE RÖNTGENRÖHREN

»In Röntgenröhren besteht die Gefahr, daß die Wolframscheibe durch die auftreffenden Kathodenstrahlen durchgebrannt wird. [Treffen sie] auf die Kupferanode, bringen sie Kupfer zum Verdampfen. Indem sich dieses an den Wandungen niederschlägt, macht es die Röhre unbrauchbar. Dem kann abgeholfen werden, indem man die Wolframscheibe dreht. Das konnte bisher nur so geschehen, daß man die Röhre öffnete, die Scheibe anders einstellte und die Röhre von neuem evakuierte. Nun gibt T. B. Rider ein Verfahren an, das es ermöglicht, den Brennpunkt in Sekunden zu verändern. Er umgibt die Kathode mit Stahlblöckchen. Durch einen Magneten lassen sich Blöcke und Scheibe drehen.« *Die Umschau 50, S. 835*

1969


Sibirische Totenmaske aus Gips.

LEBENDIGE TOTENBILDER

»Stämme im Becken von Minussinsk haben uns eine Fülle archäologischer Reichtümer in Tausenden von Erdgräbern hinterlassen. Uns interessiert besonders der Abschnitt der ›Taschtykkultur‹. Chinesische Importstücke bezeugen, daß diese vom 4. Jahrhundert v. Chr. bis ins 1. Jahrhundert n. Chr. bestand. Das Erstaunliche dieser Gräber sind aber die Totenmasken: Masken, die das Gesicht des Toten bedecken, aus Gips und Ton. Keine Abgüsse, sondern Modellierarbeiten von erstaunlicher plastischer Wirkung.« *Kosmos 12, S. 508–511*

HOFFNUNGSTRÄGER INTERFERON

»Im Jahre 1957 entdeckten Isaacs und Lindenmann ein Protein [namens Interferon], das sich in einer Zelle dann bildet, wenn darin fremde Nucleinsäure auftritt. Die große Bedeutung liegt darin, daß es als Abwehrstoff wirkt und gegen Viren schützt, indem es die Vermehrung [ihrer] Nucleinsäuren unterbindet. Über den Wirkungsmechanismus ist noch wenig bekannt.« *Kosmos 12, S. 524*

(Interferone werden heutzutage vor allem zur Behandlung von Hepatitis und multipler Sklerose eingesetzt. D. Red.)

EIN COMPUTER MIT AUTOKORREKTUR

»Am Jet Propulsion Laboratory des California Institute of Technology wurde vor kurzem der erste STAR-Computer in Betrieb genommen. [Der] ›Self-Testing and Repairing‹ Computer ist für interplanetarische Flüge bestimmt. Der Prototyp besteht aus zehn Einheiten. Er wendet ein spezielles Codesystem zur Fehlerentdeckung an und verfügt über eine Monitoreinheit zur Diagnose und Therapie der Störung innerhalb einer Millisekunde. STAR arbeitet mit ›Worten‹, die aus einzelnen Bitketten bestehen. Jedes ›Wort‹ wird geprüft. Wird eines falsch übertragen, stellt der Monitor die Fehlerquelle fest, überprüft diese und ersetzt sie durch eine Reserveeinheit.« *Die Umschau 25, S. 850*

(STAR als Ganzes kam nie zum Einsatz, wohl aber einzelne Komponenten. D. Red).


FRANZI SCHÄDEL (FLORIAN-FREISTETTER.DE/PRESSE/) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/4.0/LEGALCODE)

FREISTETTERS FORMELWELT
DIE FALSCHE HEXE VON AGNESI

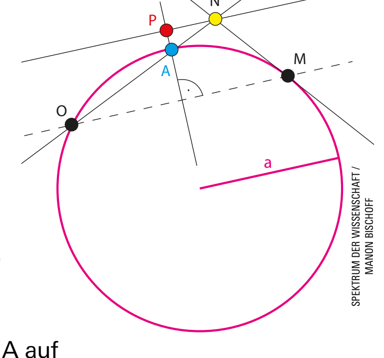
Früher sagte man gebildeten Frauen immer wieder nach, sie seien Hexen. Die »Hexe von Agnesi« beschreibt aber keine Person, sondern eine der bekanntesten Arbeiten einer italienischen Mathematikerin.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

▸▸ spektrum.de/artikel/1681214

In Mailand erschien 1748 das Buch »Instituzioni analitiche ad uso della gioventù italiana«. Es enthielt erstmals die damals noch recht neue Infinitesimalrechnung und gilt als das erste mathematische Werk, das eine Frau verfasst hat. Darin beschrieb die Autorin, Maria Gaetana Agnesi, eine Kurve, die durch folgende Formel definiert ist:

$$y = \frac{8a^3}{x^2 + 4a^2}$$



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Die Kurve lässt sich aus einem Kreis konstruieren: Dazu wählt man zwei feste Punkte (O und M), die auf einem Kreis mit Radius a liegen. Für jeden weiteren Punkt A auf dem Kreis muss man den Punkt N bestimmen, an dem die Verbindung von O zu A die Tangente in M schneidet. Dann zeichnet man eine Parallele zur Linie OM, die durch N verläuft, und eine Linie, die im rechten Winkel dazu durch den Punkt A geht. Der Schnittpunkt dieser beiden Geraden ist ein Punkt P, der auf der durch die Formel beschriebenen Kurve liegt. Die gesamte Kurve ergibt sich aus allen Punkten P, die sich auf diese Weise bilden lassen.

Agnesi hat die Kurve zwar nicht erfunden, aber bekannt gemacht. Auf Italienisch nannte man das mathematische Objekt »la versiera di Agnesi«, was an das lateinische Wort für Segel (»versoria«) erinnert und vermutlich an seine Form angelehnt ist. Das »la versiera« las der englische Mathematiker John Colson allerdings als »l'avversiera«, was er als »Hexe« interpretierte, wodurch die Kurve zu ihrem heutigen Namen kam.

Maria Gaetana Agnesis Fähigkeiten mögen durchaus »magisch« gewirkt haben. Mit neun Jahren sprach sie schon fließend Latein, zwei Jahre später beherrschte sie insgesamt sieben Sprachen und besaß zudem eine mathematische Begabung, die ihre Eltern förderten. Das Wunderkind wurde zur Mathematikerin, die ihre wissenschaftliche Karriere aber im Alter von bloß 34 Jahren beendete, als ihr Vater starb. Daraufhin wandte sich Agnesi dem Glauben zu; sie studierte Theologie und übernahm später die Leitung eines Hospizes für Frauen.

Ihre mathematische Arbeit lebt jedoch bis heute weiter. Man findet ihre Kurve in der Wahrscheinlichkeitsrechnung, der Polynominterpolation oder der Modellierung von Wellen. Interessanterweise trifft man sogar in der Astronomie auf die »Hexe von Agnesi«. Die Kurvengleichung taucht in einer Arbeit aus dem Jahr 1932 auf, in der es darum geht, die Form von Spektrallinien im Röntgenlicht zu beschreiben.

Solche Linien detektieren Astronomen zwar mit Messinstrumenten, doch dadurch erhalten sie nur einzelne Datenpunkte. Um genauere Analysen durchzuführen, müssen sie die Messwerte durch eine Kurve mathematisch beschreiben. Agnesis Kurve scheint sich dafür gut zu eignen – insbesondere wenn man die Fläche berechnen möchte, die unter der Kurve der Spektrallinie liegt. Diese Fläche ist ein Maß für die so genannte Linienintensität, aus der sich die chemische Zusammensetzung der elektromagnetisch strahlenden Körper bestimmen lässt. Das macht die Spektroskopie zu einem der wichtigsten Instrumente der Astronomie, etwa wenn es darum geht, mehr über das Innere unerreichbar ferner Himmelskörper herauszufinden.

Astronomen können mit dieser Methode noch aus dem schwächsten Licht unglaublich viele Informationen ziehen. Mit der richtigen Technik und Mathematik können wir Sterne und Galaxien untersuchen, die selbst in den größten Teleskopen kaum zu sehen sind. Dadurch sind wir in der Lage, ihre Zusammensetzung, ihr Alter, ihre Temperatur und jede Menge andere Parameter zu messen, was manchmal tatsächlich wie Hexenwerk erscheinen kann …

Wissen verschenken und Freude bereiten –

mit einem Geschenk-Abonnement!

Verschenken Sie ein Abo!



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

Print 12 Ausgaben, € 93,–
Digital 12 Ausgaben, € 63,–
Print + Digital € 99,–



Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin

Print 12 Ausgaben, € 85,20
Digital 12 Ausgaben, € 63,–
Print + Digital € 91,20



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

Print 12 Ausgaben, € 93,–
Digital 12 Ausgaben, € 63,–
Print + Digital € 99,–



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung

Print 4 Ausgaben, € 30,80
Digital 4 Ausgaben, € 21,–
Print + Digital € 34,80



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences

Print 4 Ausgaben, € 30,80
Digital 4 Ausgaben, € 21,–
Print + Digital € 34,80



Spannende Berichte aus Geschichte und Archäologie

Print 6 Ausgaben, € 31,20
Digital 6 Ausgaben, € 24,60
Print + Digital € 37,20



Das Magazin für den modernen selbstbestimmten Menschen

Print 6 Ausgaben, € 31,20
Digital 6 Ausgaben, € 24,60
Print + Digital € 37,20





INTERVIEW

»DER ABBAU VON MANGANKNOLLEN RÜCKT IN GREIFBARE NÄHE«

2020 soll das erste Regelwerk für den weltweiten Tiefseebergbau in Kraft treten. Carsten Rühlemann und Ulrich Schwarz-Schampera von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe berichten im Gespräch mit Spektrum, welche Hoffnungen und Gefahren damit verbunden sind.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR)

⏩ spektrum.de/artikel/1681218



BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR)



BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR)

Carsten Rühlemann

leitet den Arbeitsbereich Meeresgeologie an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover. Er erkundet Manganknollenfelder im Ostpazifik.



BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR)

Ulrich Schwarz-Schampera

leitet an der BGR den Arbeitsbereich Lagerstätten und Herkunftsnachweis metallischer Rohstoffe. Sein Team sucht nach Schwefelablagerungen in der Nähe aktiver und erloschener heißer Quellen im Indischen Ozean.



Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) erkundet seit vielen Jahren Erzvorkommen im Pazifik und im Indischen Ozean. Was erhofft sie sich davon?

Carsten Rühlemann: Unser Auftraggeber, das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, möchte die Metallversorgung Deutschlands langfristig sicherstellen. Eine Möglichkeit dafür ist es, Rohstoffe aus der Tiefsee in internationalen Gewässern abzubauen. Die BGR soll klären, welche Mengen an wertvollen Metallen dort unten liegen und ob sich ein zukünftiger Abbau lohnen würde. Manganknollen etwa enthalten mit Mangan, Kobalt, Kupfer und Nickel vier wichtige Metalle, die in Elektroautos stecken – und der Ausbau der E-Mobilität ist ja ein Kernanliegen der Bundesregierung, um Deutschlands Klimaschutzziele möglichst zügig zu erreichen. Voraussetzung für den Abbau ist ein sicherer Rechtsrahmen der Internationalen Meeresbodenbehörde *(ISA: International Seabed Authority; Anm. d. Red.)*.

Metallhaltige Schätze: Die Kamine »schwarzer Raucher« an Hydrothermalquellen in der Tiefsee (linkes Bild) bestehen aus Sulfidmineralen. Manganknollen (rechtes Bild) beherbergen Metalle, die für die Elektromobilität wichtig sind.

Ulrich Schwarz-Schampera: Für die deutschen Lizenzanträge hat die internationale Staatengemeinschaft eine große Rolle gespielt. Die ISA hat 168 Mitglieder, inklusive der Europäischen Union *(sie wurde 1994 gegründet, als das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen in Kraft trat; Anm. d. Red.)*. Es ist politisch sehr wichtig, dass die Rohstoffexploration im Verbund und behördlich kontrolliert erfolgt. Deutschland hat innerhalb der ISA ein gewisses Gewicht, und indem wir an vorderster Front mitarbeiten, können wir auch bei der Entwicklung von Umweltstandards mitbestimmen.

Neben Manganknollenfeldern untersuchen Sie Sulfidlagerstätten. Welche Elemente sind hier interessant?

Schwarz-Schampera: Diese Sulfide enthalten vor allem Kupfer, Zink und Blei. Außerdem weisen sie Edelmetalle wie Gold und Silber auf sowie Spurenmetalle, die man unter anderem in LEDs einsetzt, wie Gallium, oder in Glasfaserkabeln, beispielsweise Germanium. Zink dient in der Fahrzeugindustrie als Korrosionsschutz. Blei steckt in den Bleiakkus fast aller Autos mit konventionellem Antrieb. Wenn eines Tages jeder ein E-Auto besitzt, benötigen wir das Blei nicht mehr. Dafür steigt der Bedarf an Kupfer, denn batteriebetriebene Autos enthalten zwölf Kilogramm mehr davon als solche mit Verbrennungsmotor. Allein in Deutschland sind über 46 Millionen Fahrzeuge zugelassen. Hinzu

kommen Milliarden Autos in den übrigen europäischen Staaten sowie in Nordamerika, China, Indien … Landlagerstätten könnten den Kupferbedarf zwar decken. Der Preis dafür wären jedoch neue, sehr tiefe Gruben, etwa in Chile. Da stellt sich die Frage nach der Akzeptanz bei den Menschen vor Ort.

Manganknollen bestehen zu knapp einem Drittel aus Mangan. Würde der Weltmarktpreis für das Metall durch den Tiefseebergbau nicht einbrechen?
Rühlemann: Das hängt von der Qualität des produzierten Metalls ab. So ist der Markt für hochreines Mangan relativ klein. Dort wären durchaus Auswirkungen auf den Preis zu erwarten. Bei Mangan von geringerer Qualität, welches die Masse der Erzeugung ausmacht, ist hingegen kein Preiseinbruch zu erwarten. Ein einzelnes Unternehmen könnte ein Gebiet von zirka 200 Quadratkilometern pro Jahr abbauen. Das entspricht der Fläche der Stadt Hannover und einer Knollenmenge, die rund 840000 Tonnen Mangan enthält. Das sind vier bis fünf Prozent der jährlichen Bergwerksförderung weltweit.
Schwarz-Schampera: Man sollte auch immer bedenken, wo die Rohstoffe an Land herkommen. Die größten Manganlagerstätten der Erde gehören dem indischen Stahlproduzenten Tata Steel. Was, wenn es irgendwann heißen sollte: »Indisches Mangan für indischen Stahl« – ihr könnt gerne unseren Stahl kaufen, aber wir liefern euch kein Mangan? Für solche Szenarien müssen wir uns um Alternativen Gedanken machen.

»Wir verwenden etwa die Hälfte unseres Budgets für Umweltuntersuchungen«

Carsten Rühlemann

Was kostet der Zugang zu den begehrten Technologiemetallen in der Tiefsee?
Rühlemann: Für den Antrag auf ein Lizenzgebiet berechnet die ISA zurzeit 500000 US-Dollar Bearbeitungsgebühr. Aber noch sehr viel teurer ist es, das Gebiet zu kartieren und Gesteinsproben zu sammeln. Außerdem sind die Lizenznehmer zu umfangreichen Umweltuntersuchungen verpflichtet. Dafür verwenden wir etwa die Hälfte unserer Finanzmittel, das sind zwischen zehn und zwölf Millionen Euro pro Jahr für beide Lizenzgebiete zusammen.

Wir groß sind die Claims, die man nach erteilter Genehmigung abstecken darf, und welche Regionen stehen hier im Fokus?
Rühlemann: Deutschland hat seit 2006 ein Lizenzgebiet im Ostpazifik, das aus zwei Arealen mit einer Gesamtfläche von 75000 Quadratkilometern besteht. Es liegt in der Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) zwischen Hawaii und Mexiko (siehe »Von der Erkundung zum Abbau«, rechts). Auf einer Fläche von rund fünf Millionen Quadratkilometern – etwa der Größe der Europäischen Union – findet man in dieser Zone die weltweit größten Vorkommen an Manganknollen. Die Lizenznehmer dürfen zunächst 150000 Quadratkilometer Meeresgrund explorieren. Anschließend müssen sie innerhalb dieses Gebiets zwei annähernd gleich große Flächen ausweisen, die Manganknollen von gleichem Wert enthalten. Die eine Hälfte überlässt die ISA dem Lizenznehmer zur weiteren Erkundung, die andere behält sie.
Schwarz-Schampera: Seit 2011 sucht die BGR im Indischen Ozean nach Massivsulfiden, seit 2015 mit offiziellem wirtschaftlichem Interesse und einer Genehmigung der ISA. Anders als die Manganknollen müssen wir diese Schwefelerze jedoch erst einmal finden. Wir haben einen Claim von 10000 Quadratkilometern abgesteckt. Nach acht Jahren geht die Hälfte davon zurück an die ISA und zwei Jahre später nochmals ein Viertel.

Was geschieht mit den zurückgegebenen Flächen?
Rühlemann: Entwicklungsländer können Lizenzen für die vorerkundeten Flächen beantragen. So hat die ISA etwa vor wenigen Wochen zugestimmt, dass ein drittes Unternehmen aus China eine Lizenz zur Exploration von Manganknollenfeldern erhalten soll.

Die Rohstoffschätze in der Tiefsee gelten als gemeinsames Erbe der Menschheit. Wie würde dafür gesorgt, dass von einem Abbau nicht nur einzelne Staaten profitieren?
Rühlemann: Die Regularien existieren noch nicht, werden aber seit Anfang 2017 verhandelt, inklusive der damit verbundenen Abgaben und Gebühren. Für eine Abbaulizenz werden voraussichtlich eine Million Dollar Bearbeitungsgebühr fällig. Dazu kämen jährliche Zahlungen in noch unbekannter Höhe, die sich entweder am Metallwert der Knollen oder an dem Gewinn orientieren, den Unternehmen mit den geförderten Rohstoffen erzielen. Einen Großteil dieser Einnahmen würde die ISA an die ärmsten Entwicklungsländer ausschütten.

Es gab mehrere Schiffsexpeditionen in das deutsche Lizenzgebiet im Ostpazifik. Welche Menge an Manganknollen beherbergt der Meeresgrund dort?
Rühlemann: Die Knollen liegen fast überall in der CCZ. Rund zwei Drittel des 60000 Quadratkilometer großen östlichen Teils des deutschen Lizenzgebiets sind von Erzklumpen mit einem Durchmesser von bis zu 4 Zentimetern bedeckt, knapp zehn Prozent von 4 bis 15 Zentimeter dicken Knollen. Insgesamt lagern im östlichen Gebiet Manganknollen mit einem Nassgewicht von etwa 760 Millionen Tonnen. Wir haben uns bei der Erkundung auf drei wirtschaftlich interessante Areale konzentriert, die zusammen 4000 Quadratkilometer umfassen. Dort findet man pro Quadratmeter im Schnitt 20 Kilogramm Knollen. Das sind hochgerechnet gut 80 Millionen Tonnen auf nur fünf Prozent des deutschen Lizenzgebiets. Um diese Menge abzubauen, würde ein Unternehmen etwa zwei Jahrzehnte benötigen.

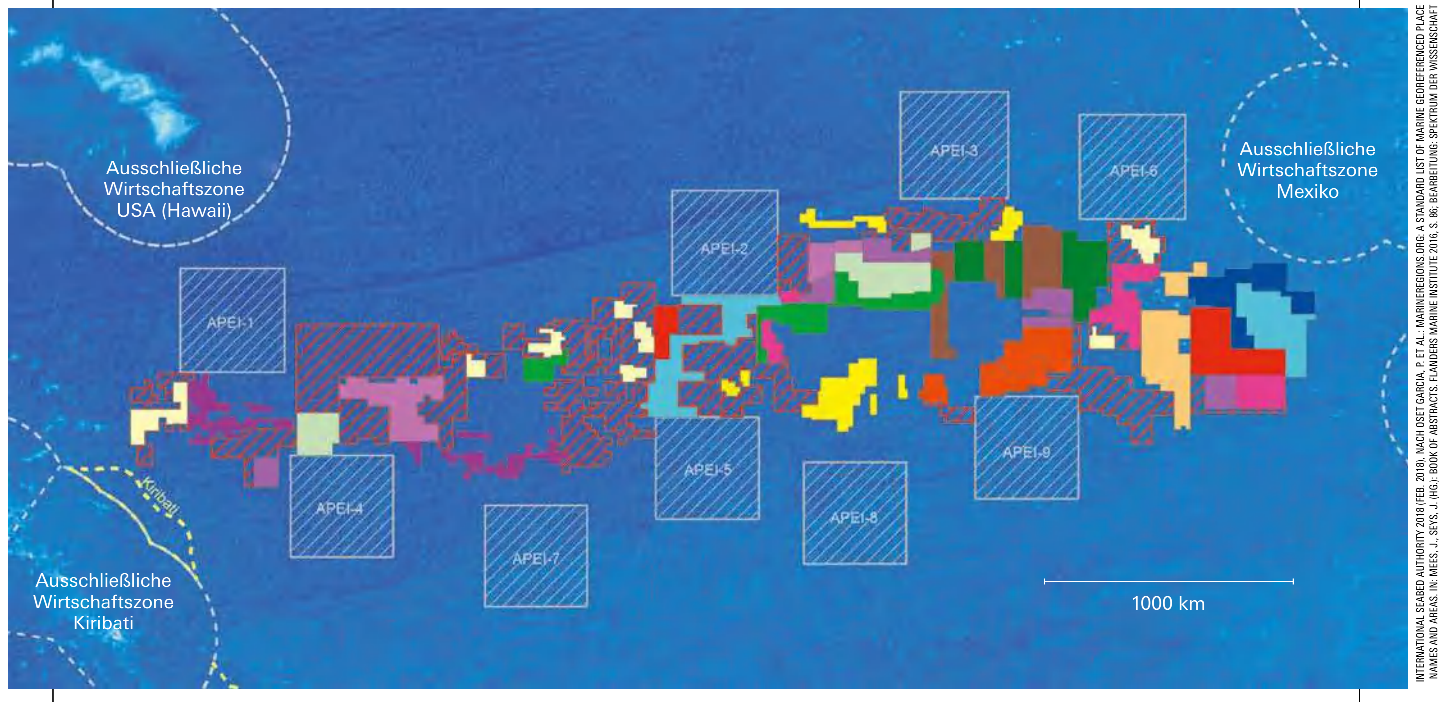
Von der Erkundung zum Abbau

Auf dem Meeresgrund lagern begehrte Metallvorkommen. Vor allem Manganknollen, Kobaltkrusten und Massivsulfidlagerstätten kommen für eine kommerzielle Nutzung in Frage.

Für Gebiete in internationalen Gewässern ist die Internationale Meeresbodenbehörde (ISA) zuständig. Sie vergibt Rechte zur Erkundung von Metalllagerstätten. Bislang hat sie 17 Lizenzen für die Erkundung von Manganknollen, 7 für Massivsulfide und 5 für Kobaltkrusten erteilt. Besonders reich an Manganknollen ist die Clarion-Clipperton-Zone (CCZ, siehe Karte) im Ostpazifik. Hier besitzt auch Deutschland bis 2021 Explorationsrechte und wird vermutlich eine Verlängerung beantragen. Massivsulfidlagerstätten erforscht Deutschland in einem Gebiet im Indischen Ozean (nicht gezeigt).

Abbaulizenzen hat die ISA bislang nicht vergeben. Dazu verfasst sie derzeit ein Regelwerk, das 2020 in Kraft treten soll. Beteiligte sehen diesen Schritt als Chance: Es ist ein Novum, dass internationale Regeln vereinbart werden sollen, bevor einzelne Länder mit dem Rohstoffabbau beginnen – und nicht im Nachhinein.

Das weltweit erste Projekt zum untermeerischen Abbau von Metallerzen ist indes im September 2019 endgültig gescheitert. Die kanadisch-australische Firma Nautilus Minerals wollte die Metallsulfidlagerstätte Solwara 1 in der Bismarcksee vor Papua-Neuguinea ausbeuten, ist aber seit Ende 2018 zahlungsunfähig. Nun haben die Regierungschefs von Vanuatu und Fidschi, in deren Gewässern ebenfalls erhebliche Rohstoffmengen am Meeresboden liegen, dazu aufgerufen, bis 2030 alle Tiefseebergbauaktivitäten zu stoppen, um weitere Forschung zu ermöglichen.



INTERNATIONAL SEABED AUTHORITY 2018 (FEB. 2018), NACH OSET GARCIA, P. ET AL.: MARINEREGIONS.ORG: A STANDARD LIST OF MARINE GEOREFERENCED PLACE NAMES AND AREAS. IN: MEES, J., SEYS, J. (HG.): BOOK OF ABSTRACTS. FLANDERS MARINE INSTITUTE 2016, S. 86; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Die deutsche Lizenz für den Ostpazifik läuft 2021 aus. Streben Sie an, diese zu verlängern? Welche offenen Fragen gibt es jetzt nach 15 Jahren Forschung noch?

Rühlemann: Ich rechne damit, dass das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie die Knollenfelder auch über 2021 hinaus erkunden lassen möchte. Die Exploration der Manganvorkommen im östlichen Teil des deutschen Lizenzgebiets ist weitgehend abgeschlossen. Unsere wichtigste Aufgabe wäre dort dann das Umweltmonitoring. Die belgische Firma DEME will bald erstmalig ein Erntefahrzeug für Manganknollen in fünf Kilometer Wassertiefe einsetzen, im belgischen und im deutschen Lizenzgebiet. Wir würden nach dem Test schauen: Wie schnell regeneriert sich die Fauna? Welche Arten kommen zuerst zurück? Wie verändert sich das geochemische Milieu durch den Abbau? Dafür hätten wir dann weitere fünf Jahre Zeit. Darüber hinaus würden wir die Artenvielfalt weiter erfassen. Wir wissen bislang noch wenig über die Organismen, die in der Wassersäule schwimmen. Aber auch über die Tiere, die auf oder im Meeresboden leben, gibt es noch viel zu lernen. Dazu könnten wir vermutlich noch 100 Jahre lang weiterforschen.

Bei den Sulfidlagerstätten geht es um ganz andere Fragen. Welche Erkundungen haben Sie bislang im Lizenzgebiet im Indischen Ozean unternommen?

Schwarz-Schampera: Wir erforschen den Meeresboden dort seit 2011. Es gab inzwischen neun Expeditionen in dem Gebiet, das 10 000 Quadratkilometer umfasst. Das Areal ist also deutlich kleiner als jenes im Ostpazifik. Aber anders als die Manganknollen liegt das, was wir suchen, nicht einfach flächendeckend herum.

Wie kann man sich die Schwefellagerstätten vorstellen? Ragen sie aus dem Meeresgrund, oder sind sie von Sediment bedeckt, so dass man erst einmal metertief im Schlamm buddeln muss, um an die Erze zu gelangen?

Schwarz-Schampera: Beides kommt vor. Wir suchen an der Oberfläche des Sediments nach Anzeichen dafür, dass darunter Metalle liegen. Das Schöne bei den Sulfidfeldern ist: Wenn sie sich bilden, fangen sie an zu rauchen. Jeder kennt die Bilder von dicht besiedelten heißen Quellen, den schwarzen Rauchern. Diese können wir leicht aufspüren. Mit Sensoren für die Trübung und reduzierte chemische Verbindungen können wir im Wasser die Rauchfahnen von Hydrothermalquellen messen. Schwieriger ist es, erloschene heiße Quellen zu finden. Dafür benötigt man eine Kamera dicht über dem Meeresboden oder sehr genaue Kartierungen vom Grund, die entsprechende Strukturen erkennen lassen.

Exotische Arten – kaum entdeckt, schon bedroht?

Auf dem Meeresboden in der Tiefsee finden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler massenweise noch unbekannte Spezies, von Würmern über Aale bis zu exotischen Tintenfischen wie dem 2016 entdeckten »Casper-Kraken« (Bild links), der auf Manganknollen brütet.

Im Juli 2019 wurde die Schuppenfuß-Schnecke (*Chrysomallon squamiferum*, Bild rechts) als »durch den Tiefseebergbau vom Aussterben bedroht« klassifiziert – als erste Spezies weltweit. Das wenige Zentimeter kleine Weichtier siedelt an Hydrothermalspalten in der Tiefsee. Es entzieht dem metallhaltigen Wasser Eisen, um seinen Fuß sowie sein Haus mit Schuppen aus Eisensulfid zu bedecken. Die Schnecke lebt an nur drei hydrothermalen Quellen im Indischen Ozean – zwei davon befinden sich in Erkundungsgebieten für den Abbau von Sulfiderzen.

NOAA OFFICE OF OCEAN EXPLORATION AND RESEARCH

Dieser kleine Krake brütet auf Manganknollen und wurde 2016 entdeckt.



MIT FRDL. GEN. VON CHONG CHEN, SQUAMIFERUM.NET

Die Schuppenfuß-Schnecke beschichtet Fuß und Haus mit schwarzem Eisensulfid.

Welche Ausmaße erreichen denn solche Sulfidlagerstätten?
Schwarz-Schampera: Wir wissen nicht, wie es weiter unten in den Ablagerungen aussieht. Aber es gibt Sulfidlagerstätten, die einmal untermeerisch entstanden sind und heute an Land liegen und abgebaut werden. Diese können bis zu dreieinhalb Kilometer tief sein. Der Abbau von Metallsulfiden geht weniger in die Fläche als in die Tiefe. Bis vor einiger Zeit war unklar, ob solch große Lagerstätten auch am Meeresgrund existieren. Inzwischen bin ich mir sicher, dass es sie gibt. Die größte, die wir bislang gefunden haben, besteht aus zwölf Hügeln mit jeweils 250 bis 300 Meter Durchmesser, die sich über knapp drei Kilometer erstrecken.

Manganknollen kann man einfach aufsammeln. Wie würde man hingegen Schwefelerze in der Tiefsee abbauen?
Schwarz-Schampera: Es gibt ein Projekt von zwei deutschen Firmen zur Förderung von sulfidischen Gesteinen mit Hilfe einer so genannten Schlitzwandfräse. Dieses Gerät kommt etwa beim Straßenbau sowie beim Errichten von Hafenmauern oder der Fundamente von Offshore-Windkraftanlagen zum Einsatz. In absehbarer Zeit soll ein solche Fräse für den Unterwassereinsatz angepasst und in der Tiefsee getestet werden.

Meeresforscher und Umweltschützer warnen immer wieder eindringlich vor dem Tiefseebergbau. Welche Schäden drohen dem empfindlichen Ökosystem dadurch?
Rühlemann: Bei der Ernte von Manganknollen würde auch der Meeresboden entfernt, die oberen zehn Zentimeter ungefähr. In dieser Zone wohnen viele Lebewesen, zum Beispiel winzige Fadenwürmer und Krebstiere. Daneben gibt es Tiere, die auf den Knollen siedeln – Schwämme oder Korallen etwa. Sie können nur auf festem Untergrund wachsen und würden durch die Förderung ihren Lebensraum verlieren. Die Abbauflächen sind aber wohl das kleinere Problem. Denn nur rund 20 Prozent der CCZ sind überhaupt für den Abbau geeignet, weil der Boden dort flach genug ist und die Knollen ausreichend dicht beieinanderliegen. Die Erntefahrzeuge würden jedoch Sediment am Meeresgrund aufwirbeln. Der Großteil dieser feinen Partikel verklumpt zwar schnell zu größeren Aggregaten und sinkt zügig wieder ab. Etwa fünf bis zehn Prozent verbleiben jedoch als Schwebeteilchen im Wasser. Und es ist unklar, wie weit sich diese Partikel verbreiten und wie stark sie Organismen abseits der Abbaugebiete schädigen würden. Die Organe von Tieren, die ihre Nahrung aus dem Wasser filtern, könnten beispielsweise verstopfen. Das wollen Meeresforscher in einer unabhängigen Umweltstudie untersuchen.
Schwarz-Schampera: Bei den Schwefelerzen besteht dieses Problem nicht, weil es sich um junges Gestein handelt, auf dem sich erst wenige Zentimeter Sediment abgelagert hat. Zwar würden auch hier Partikel aufgewirbelt, doch die Sedimentwolke wäre nicht groß. Kritischer ist hier die Frage, ob der Abbau reduzierte chemische Verbindungen freisetzt. Diese könnten in der Folge oxidieren und feine Partikel bilden, die zu Boden sinken. Da der Schwefelerzabbau auf einer relativ kleinen Fläche – verglichen mit den Knollenfeldern – stattfindet, ließe sich das jedoch besser kontrollieren. Der vermutlich wichtigere Aspekt ist die Artenvielfalt an den schwarzen Rauchern. Wir wissen, dass es weltweit entlang der ozeanischen Spreizungszonen einen regen Austausch zwischen Hydrothermalfeldern gibt.

»Der Abbau aktiver schwarzer Raucher ist ausgeschlossen«

Ulrich Schwarz-Schampera

Auf Grund der Lebensfülle an heißen Quellen werden diese oft als Oasen der Tiefsee bezeichnet. Könnten die einzigartigen Ökosysteme unserem Rohstoffhunger zum Opfer fallen?
Schwarz-Schampera: Der Abbau aktiver schwarzer Raucher ist ausgeschlossen; allein schon aus technischen Gründen, weil dort bis zu 400 Grad heiße Fluide mit einem pH-Wert von 2 aus dem Boden strömen, also heiße Säure. Unter diesen Bedingungen würde eine Schlitzwandfräse sehr schnell korrodieren. Die ISA hat außerdem festgelegt, dass keine Sulfiderze an aktiven Hydrothermalfeldern gefördert werden dürfen – auch, weil wir nicht im Detail wissen, was dort überhaupt lebt.

Für die Manganvorkommen in der CCZ hat die ISA Schutzgebiete ausgewiesen. Kritiker sagen, diese seien weder repräsentativ für die Fauna der Region noch ausreichend in ihrer Größe. Besteht hier Nachholbedarf?
Rühlemann: Als die Schutzgebiete ausgewiesen wurden, hat man sich vor allem am Planktonwachstum an der Meeresoberfläche orientiert. Denn je mehr Algen dort leben, desto mehr Biomasse sinkt in die Tiefsee ab. Daraus kann man aber nicht unbedingt auf eine reiche Artenvielfalt schließen. Tatsächlich ist es oft umgekehrt: Je weniger Biomasse, desto höher die Biodiversität. Als man 2010 die neun Schutzzonen festgelegt hat, wusste man nur rudimentär, wo welche Arten vorkommen. Heute liegen wesentlich mehr Daten vor, und es sollen weitere Schutzzonen hinzukommen. Die Lage der bereits bestehenden ist auch darin begründet, dass ein Umweltmanagement-Plan erst verabschiedet wurde, nachdem die Erkundung der Knollenfelder schon lange begonnen hatte. Deshalb ist zurzeit unklar, ob die existierenden Schutzgebiete die Meeresbodenfauna in der Region angemessen repräsentieren.

Wessen Aufgabe wäre es, das herauszufinden?
Rühlemann: Die der internationalen Staatengemeinschaft. Nur: Wer bezahlt das? Die ISA-Mitglieder wollen keine höheren Beiträge leisten. Im Grunde sind es neben den

Lizenznehmern vor allem die EU und die USA, die auf diesem Gebiet aktiv sind. Im Rahmen des Projekts »Mining Impact« haben europäische Forscher den östlichen Bereich der CCZ intensiv untersucht und dabei auch die Schutzgebiete unter die Lupe genommen. Aber es gibt leider noch keine systematische und koordinierte Erforschung der gesamten Zone.
Schwarz-Schampera: Die ISA hat einen Etat von rund acht Millionen Dollar pro Jahr. Zum Vergleich: Die BGR gibt etwa sechs Millionen Euro jährlich nur für die Sulfidexplorationen aus, ähnlich sind die Kosten für die Manganexploration. Das zeigt, wie mangelhaft die ISA finanziell ausgestattet ist.


SUPERJOSEPH / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter
spektrum.de/t/tiefsee

Noch einmal zu den Schutzgebieten: In Knollenfeldern im Ostpazifik, die man vor Jahrzehnten testweise umgepflügt hat, sucht man noch heute viele Arten vergebens. Müsste man nicht also weit größere Flächen für die Rohstoffförderung sperren?
Rühlemann: Die Idee hinter den Schutzgebieten ist ja, dass neben dem Erhalt der Biodiversität Organismen wieder einwandern können, die durch den Abbau verschwinden würden. Dafür allerdings liegen die Schutzgebiete eigentlich zu weit auseinander. Man müsste deshalb dafür sorgen, dass Flächen innerhalb der Lizenzgebiete unangetastet bleiben, damit Arten aus wenigen zehn Kilometern Entfernung wieder einwandern können, nicht aus mehreren hundert bis tausend Kilometern.
Schwarz-Schampera: Man darf nicht vergessen, dass es außerdem große Flächen gibt, die sich etwa wegen der Hangneigung nicht für den Erzabbau eignen. Manche Areale würden also schon auf Grund natürlicher Gegebenheiten nicht angerührt.
Rühlemann: Schätzungsweise 20 Prozent des deutschen Lizenzgebiets im Ostpazifik kämen für den Abbau in Frage. Rechnet man diese Zahl auf die gesamte Clarion-Clipperton-Zone außerhalb der Schutzgebiete hoch, so könnte ein einzelnes Unternehmen etwa 3500 Jahre lang Manganknollen fördern. Drei bis fünf Abbauunternehmen halte ich für realistisch. Die Gewinnung könnte sich daher über Jahrhunderte, wenn nicht ein Jahrtausend hinziehen – falls es überhaupt dazu kommt. Die einzelnen Abbaugebiete in der CCZ, die weit voneinander entfernt liegen, hätten demnach Zeit, sich zu regenerieren. Außerdem gibt es riesige Flächen in den Ozeanen, die noch nicht erkundet wurden und auf denen sehr wahrscheinlich weitere gewaltige Vorräte an Manganknollen lagern. Es besteht demnach keine Notwendigkeit, große zusammenhängende Flächen abzuernten.

Wie würde die Einhaltung von Umweltrichtlinien kontrolliert, wenn es zum Abbau kommen sollte?
Rühlemann: Durch unabhängige Inspektoren, welche die ISA auf die Schiffe schicken würde, und zusätzlich durch die nationalen Aufsichtsbehörden. In Deutschland wäre dafür das niedersächsische Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie zuständig.
Schwarz-Schampera: Bereits heute sind die Lizenznehmer angehalten, Trainees auf Expeditionen mitzunehmen. Die von der ISA ausgewählten Teilnehmerinnen und Teilnehmer stammen meist aus Entwicklungsländern. Oft sind es Chemiker, Geologen, Ozeanografen oder Ingenieure. Sie schreiben Berichte für die ISA, die zum Beispiel den Umweltschutz ansprechen. In diesen Berichten wird unsere Arbeit protokolliert, und sie enthalten Empfehlungen, was verbessert werden könnte. Es ist gut, dass es dieses System gibt.

Wird der Startschuss für den kommerziellen Tiefseebergbau in den nächsten Jahren fallen?
Rühlemann: Ich würde sagen, dass der Abbau der Manganknollen in greifbare Nähe gerückt ist. Wichtig wird dabei die Höhe der Abgaben an die ISA sein. Laut einer Studie des Massachusetts Institute of Technology in deren Auftrag würde sich Tiefseebergbau bei moderaten Abgaben wirtschaftlich lohnen. Ein weiterer Punkt ist die Metallurgie: Wie viel es kostet, aus den Knollen die Metalle zu gewinnen, kann bislang nicht genau beziffert werden, da es noch kein etabliertes industrielles Verfahren dafür gibt. Ob sich Tiefseebergbau wirklich lohnen wird, ist deshalb momentan schwer zu sagen. Die Verarbeitung von Manganknollen ist kompliziert und macht rund die Hälfte bis zwei Drittel der Investitions- und Betriebskosten aus. Um diese besser beurteilen zu können, planen wir für das Jahr 2020 mit der RWTH Aachen einen großtechnischen Demonstrationsversuch. Dabei wollen wir zwölf Tonnen Manganknollen verarbeiten. Das Verfahren – ein so genanntes Zero-Waste-Verfahren, bei dem idealerweise keine Reststoffe anfallen – hat im Labormaßstab bereits funktioniert. Die Firma DEME, die den Test eines Erntefahrzeugs im Ostpazifik plant, will Manganknollen ab 2028 industriell fördern. Sie geht davon aus, dass es dann wirtschaftlich lukrativ sein wird. ◂

Das Interview führte **Tim Kalvelage**, promovierter Biogeochemiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

LITERATURTIPP

Peacock, T., Alford, M. H.: Goldrausch in der Tiefsee. Spektrum der Wissenschaft 1/2019, S. 44–49

Die Autoren beschreiben das Rennen um die Ausbeutung und den Schutz des Meeresbodens.

WEBLINKS

www.spektrum.de/news/1410894

Was der Tiefseebergbau für die Meeresbewohner bedeutet

https://themenspezial.eskp.de/rohstoffe-in-der-tiefsee

Eine Themensammlung der Wissensplattform »Erde und Umwelt« rund um Rohstoffe am Meeresboden

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN
SPURENSICHERUNG MIT BLEISTIFT, BÜROKLAMMER UND BLOCKBATTERIE

Ob am Flughafen oder bei der Überführung von Straftätern: Personen anhand von Fingerabdrücken zu identifizieren, ist in vielen Bereichen Routine. Am Tatort sichern speziell ausgebildete Fachleute die Spuren. Das Prozedere kann Laien aber auch mit Haushaltsgegenständen gelingen.





Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg. **Rachel Fischer** forscht in Oetkens Arbeitsgruppe im Bereich der Forensischen Chemie.

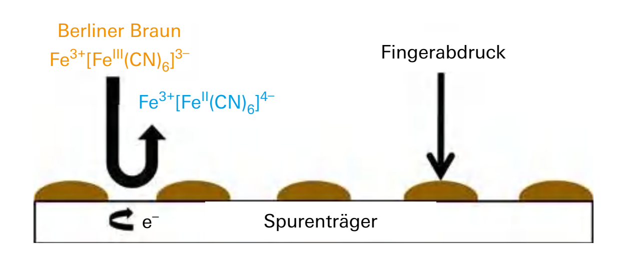
spektrum.de/artikel/1681222

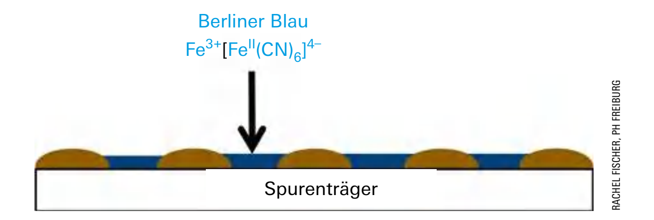
Die Daktyloskopie (wörtlich: »Fingerbeschau«) spielt seit mehr als 100 Jahren eine zentrale Rolle bei der Aufklärung von Verbrechen. Die erste Methode, die eine Visualisierung nicht direkt sichtbarer Fingerabdrücke am Tatort ermöglicht hat, nutzte dazu ein feines Pulver, beispielsweise Kohlestaub. Man gab es auf die zu untersuchende Fläche, wodurch darauf vorhandene Abdrücke sichtbar wurden. Die Technik wird bis heute eingesetzt und ist auch in Film und Fernsehen zu sehen. Daneben sind mittlerweile zahlreiche weitere Verfahren entwickelt worden, die je nach Beschaffenheit und Farbe der Oberfläche (des »Spurenträgers«), dem Alter der Spur und den äußeren Bedingungen (etwa nasse oder trockene Umgebung) gezielt ausgewählt und eingesetzt werden können.

Heute arbeitet die daktyloskopische Forschung einerseits daran, bestehende Verfahren zu optimieren, und andererseits daran, neuartige Visualisierungsmethoden zu entwickeln. Maßgebend ist dabei vor allem, dass die Verfahren einfach zu handhaben sind, die eingesetzten Chemikalien ungefährlich und das Abbild des Fingerabdrucks eine hohe Qualität aufweist.

Für elektrisch leitende und nicht saugfähige Unterlagen gibt es seit etwa 15 Jahren eine Visualisierungsmethode. Grundlage dafür ist eine Redoxreaktion zwischen der aufgebrachten Substanz und dem Spurenträger. Weil die talgreichen Rückstände des Fingerabdrucks an der Unterlage haften, verhindern sie deren Kontakt zum Nachweisreagens, so dass keine Reaktion stattfindet. In der Folge erhält man einen Negativabdruck, der fotografiert und ausgewertet werden kann (siehe Grafik links).

Herkömmlicherweise setzen Spurensicherer dazu Metallsalzelektrolyte wie zum Beispiel eine Kupfersulfat-





RACHEL FISCHER, PH FREIBURG

Schematische Darstellung einer kathodischen Berliner-Blau-Abscheidung auf einem elektrisch leitfähigen Spurenträger. Oben: zu Beginn der Elektrolyse, unten: nach erfolgreicher Visualisierung.



Mit Hilfe einer Berliner-Braun-Lösung und gängigen Alltagsgegenständen kann man Fingerabdrücke auf verschiedenen Oberflächen sichtbar machen. Aus Berliner Braun entsteht bei der chemischen Reaktion Berliner Blau, das sich auf dem Spurenträger abscheidet.

RACHEL FISCHER, PH FREIBURG

Lösung ein. Bei der Reaktion mit dem Spurenträger scheidet sich Kupfer um den Fingerabdruck herum ab, während das Fingerabdrucksekret unberührt bleibt (siehe **Spektrum** November 2017, S. 44). Aktuell erforschen Wissenschaftler, ob sich hierfür auch eine Berliner-Braun-Lösung eignet, bei der sich Berliner Blau an der Kathode abscheidet. Die dabei gewonnenen Fingerabdrücke sollen wesentlich detailreicher sein als diejenigen, die sich unter Einsatz einer Metallsalzlösung gewinnen lassen.

Berliner Blau ist ein tiefblaues anorganisches Farbpigment. Es war im 18. und 19. Jahrhundert in Europa weit verbreitet und wurde zum Einfärben von Kleidung sowie als Malfarbe genutzt, zum Beispiel von berühmten Künstlern wie Jean-Antoine Watteau, Vincent van Gogh oder Pablo Picasso. Darüber hinaus färbte man mit dem Pigment die preußischen Uniformen ein, weshalb es unter dem Namen Preußisch Blau bekannt geworden ist.

Bis heute verwendet man Berliner Blau unter anderem als Aquarell-, Öl- und Druckfarbe, aber auch in elektrochromen Fensterscheiben, die sich durch Anlegen einer geringen Spannung auf Knopfdruck abdunkeln lassen (siehe **Spektrum** Mai 2017, S. 52). Der ungefährliche Eisen(III)-hexacyanidoferrat(II/III)-Komplex mit der Zusammensetzung $Fe^{III}_4[Fe^{II}(CN)_6]_3 \cdot n\ H_2O$ erscheint tiefblau, da zwischen den enthaltenen Eisen(II)- und Eisen(III)-Ionen Ladung übertragen wird. Bei diesem so genannten Charge-Transfer-Übergang absorbiert der Stoff Licht einer Wellenlänge von 640 Nanometern. Man erhält die Verbindung, indem man ein Eisen(III)-Salz mit gelbem Blutlaugensalz, Kaliumhexacyanidoferrat(II), vermischt. Dabei bildet sich lösliches Berliner Blau mit der Formel $K[Fe^{II}Fe^{III}(CN)_6]$. Bei Zugabe von Eisenüberschuss entsteht das unlösliche Pigment.

Stellt man Berliner Blau wie beschrieben nasschemisch her, ist es jedoch unmöglich, das Produkt auf einer elektrisch leitfähigen Unterlage – dem Spurenträger mit dem Fingerabdruck – abzuscheiden. Daher produziert man es für die Spurensicherung elektrochemisch aus einer Berliner-Braun-Lösung. In der Forschung wird diese Elektrolyse unter Verwendung einer Arbeits-, einer Referenz- und einer Gegenelektrode durchgeführt. Die Arbeitselektrode besteht aus einem mit Indiumzinnoxid beschichteten Glas (ITO-Glas, nach dem englischen indium tin oxide), auf dem ein Fingerabdruck hinterlassen





RACHEL FISCHER, PH FREIBURG

Fingerabdrücke auf Tafelmessern. Links sichtbar gemacht durch eine Berliner-Blau-Abscheidung, rechts durch eine Kupferabscheidung.

wird. Eine Platinfolie dient als Gegenelektrode und eine Silberelektrode in einer Silberchlorid-Lösung als Referenzelektrode. Danach werden die gewonnenen Fingerabdrücke unter Einsatz elektrochemischer Analyseverfahren ausgewertet.

Aber auch auf Alltagsgegenständen lassen sich Fingerabdrücke mit dieser elektrochemischen Methode relativ einfach nachweisen. Dazu reinigt man zunächst ein handelsübliches Tafelmesser mit Alkohol (Brennspiritus) und versieht es mit einem Fingerabdruck. Am besten eignet sich ein Messer mit breitem Griff ohne Verzierungen. Um den Elektrolyten zu erhalten, gibt man etwa 40 Milliliter einer 0,1-molaren Eisen(III)-sulfat-Lösung sowie dieselbe Menge an 0,1-molarer Kaliumhexacyanidoferrat(III)-Lösung zusammen. Die so entstandene Flüssigkeit füllt man in ein mindestens 100 Milliliter fassendes Glas, das als Reaktionsgefäß dient. Ein Bleistift (Anode/Pluspol), das Tafelmesser mit dem Fingerabdruck (Kathode/Minuspol), Elektrokabel aus dem Baumarkt und eine 4,5-Volt-Blockbatterie ergeben die Elektrolysezelle (siehe Bild auf S. 61). Mit Hilfe von Büroklammern werden die Kabel an den Elektroden und den Laschen der Blockbatterie befestigt. Nun elektrolysiert man – je nach Oberflächenbeschaffenheit und Materialzusammensetzung des Messers – etwa 15 Sekunden lang.

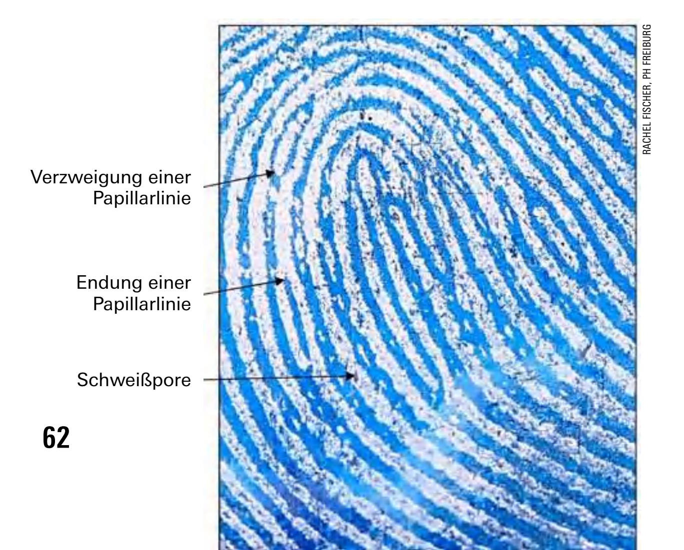
Die angelegte Spannung reduziert Eisen(III)-Ionen zu Eisen(II)-Ionen. Aus Berliner Braun entsteht so Berliner Blau, das sich auf dem Messer abscheidet (Bild unten). Folgende Reduktion findet statt:

$$\underbrace{Fe^{3+}[Fe^{III}(CN)_6]^{3-}}_{\text{Berliner Braun}} + e^- \rightarrow \underbrace{Fe^{3+}[Fe^{II}(CN)_6]^{4-}}_{\text{Bestandteil des Berliner Blau}}$$

Auf diese Weise gewinnt man Fingerabdrücke von sehr hoher Qualität. Die gute Auflösung der Abbilder lässt sich mit dem Durchmesser der abgeschiedenen Berliner-Blau-Partikel erklären: Vergleicht man Rasterelektronenmikroskopaufnahmen einer Kupferabscheidung mit denen einer Berliner-Blau-Abscheidung auf ITO-Glas, dann zeigt sich, dass der Durchmesser von Kupferpartikeln etwa 250 Nanometer beträgt, während die Berliner-Blau-Partikel nur rund 50 Nanometer groß sind. Von Letzteren finden sich demnach auf dem Spurenträger viel mehr pro Flächeneinheit – wie bei einem Bild, das mehr Pixel enthält und dadurch höher aufgelöst ist. Der Fingerabdruck wird dadurch detailliert dargestellt – inklusive aller Minuzien (Verzweigungen und Endungen der Papillarlinien) und aller Schweißporen, welche die charakteristischen personenbezogenen Merkmale darstellen (siehe vergrößertes Bild unten). In der Daktyloskopie entspricht dieses Ergebnis der höchsten Qualität, die das Bild einer Fingerabdruckspur erreichen kann.

In der Ergänzung unter spektrum.de/artikel/1681222 sind weitere Varianten der Visualisierung latenter Fingerabdrücke mit Hilfe von Berliner Blau zu finden.

Fingerabdruck auf einem Tafelmesser, entwickelt mit Hilfe einer Berliner-Blau-Abscheidung. Die charakteristischen Merkmale sind exemplarisch gekennzeichnet.



RACHEL FISCHER, PH FREIBURG

QUELLEN

Amerkamp, U.: Spezielle Spurensicherungsmethoden. Verfahren zur Sichtbarmachung von daktyloskopischen Spuren. Frankfurt am Main, 2008

Cadd, S. et al: Fingerprint composition and aging: A literature review. Science & Justice 4, 2015

Ding, P.: Collection of rolling fingerprints by the electrochromism of Prussian blue. Dyes and Pigments 120, 2015

Ware, M.: Prussian Blue: Artists' pigment and chemists' sponge. Journal of Chemical Education 5, 2008

Zhang, M.: Latent fingerprint enhancement on conductive substrates using electrodeposition of copper. Science China Chemistry 7, 2015

PHYSIK

REISE IN DIE ABGRÜNDE DES ATOMKERNS

FOTO: WARNER

Was verleiht Protonen und Neutronen ihre Masse und ihren Spin? Auf der Suche nach Antworten wollen Physiker mit einem neuen Teilchenbeschleuniger noch viel genauer als bisher in die subatomare Welt blicken.



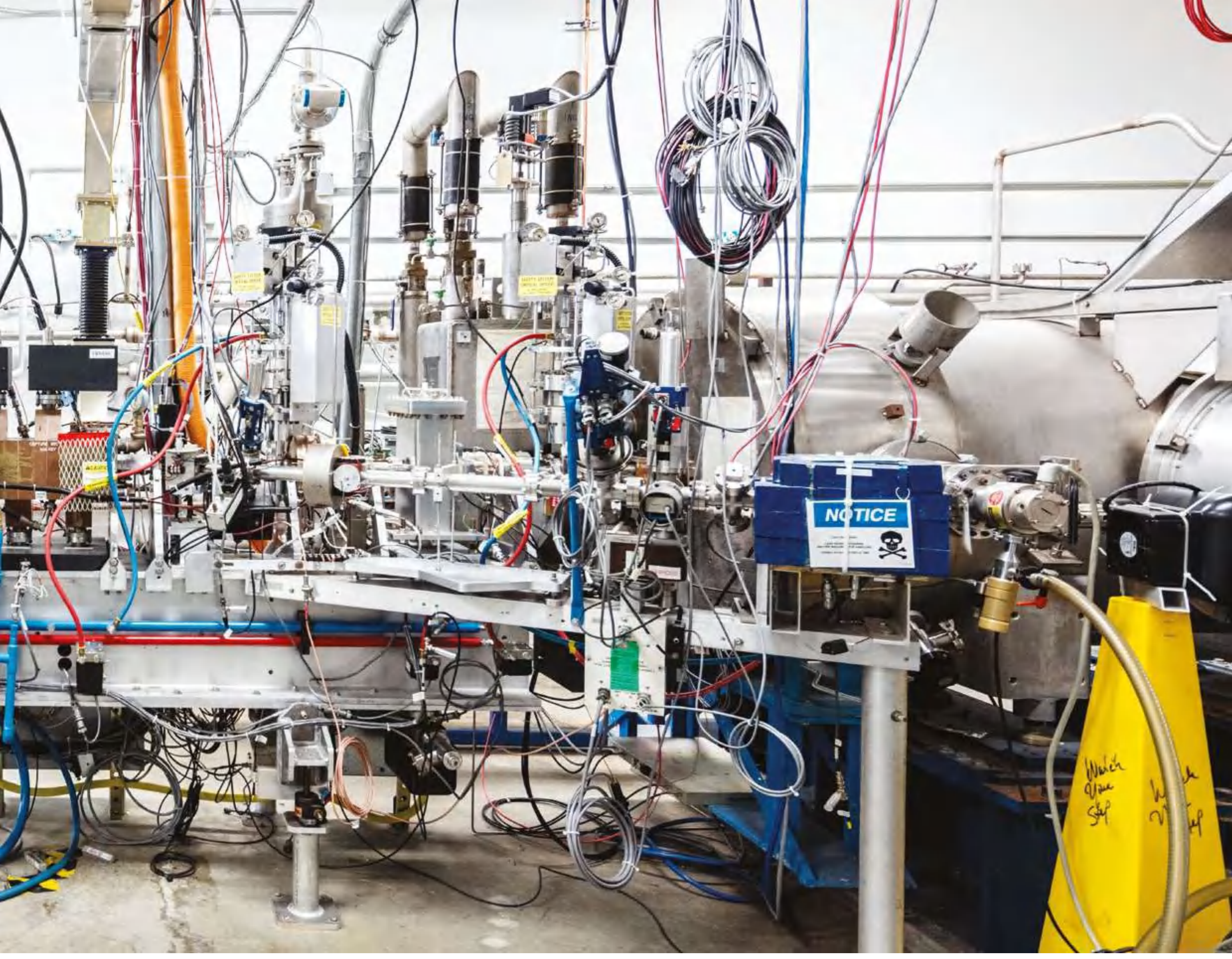

Abhay Deshpande (links) ist Professor für Physik an der Stony Brook University in New York und Gründungsdirektor des Center for Frontiers in Nuclear Science, das sich die Entwicklung und Förderung des Electron-Ion Collider (EIC) zum Ziel gesetzt hat. **Rikutaro Yoshida** war von 2016 bis 2019 Direktor des EIC Center der Thomas Jefferson National Accelerator Facility und arbeitet inzwischen am Argonne National Laboratory bei Chicago.

spektrum.de/artikel/1681226

Das beobachtbare Universum enthält grob geschätzt unfassbare 10^{53} Kilogramm normaler Materie. Den Löwenanteil zu ihrer Masse tragen rund 10^{80} Protonen und Neutronen bei. Gemeinsam mit den viel leichteren Elektronen bilden sie das Baumaterial aller Atome und Moleküle. Woher aber kommt die Masse der Kernteilchen?

Eine Antwort auf diese Frage zu finden, erweist sich als erstaunlich schwer. Klar ist: Die auch als Nukleonen bezeichneten Protonen und Neutronen bestehen ihrerseits aus so genannten Quarks. Diese sind durch masselose Gluonen miteinander verbunden. Doch die Quarks in den Nukleonen machen kaum ein Prozent von deren Gesamtmasse aus.

Der mögliche Ursprung des übergroßen Rests ist dabei nur eines von mehreren Mysterien um die Bausteine der Atome. Der quantenmechanische Drehsinn (»Spin«) der



FLOTO+WARNER

An der Continuous Electron Beam Accelerator Facility (CEBAF) der Thomas Jefferson National Accelerator Facility werden Elektronenstrahlen zu Paketen gebündelt. In einem zukünftigen Beschleuniger könnten sie auf Protonen treffen.

Nukleonen ist ähnlich unerklärlich – der Spin der Quarks in ihrem Inneren reicht dafür nicht aus. Die Wissenschaftler denken inzwischen, dass Spin, Masse und andere Eigenschaften der Nukleonen ihren Ursprung im komplexen Zusammenspiel von Quarks und Gluonen haben. Wie das vor sich geht, entzieht sich bislang ihrer Kenntnis. Die Theorie ist dabei im Augenblick nur wenig hilfreich.

Für Fortschritte hoffen die Forscher auf neue experimentelle Daten. Hier kommt ein geplanter Beschleuniger namens Electron-Ion Collider (EIC) ins Spiel. Er unterscheidet sich etwa vom Large Hadron Collider (LHC) am CERN bei Genf oder vom Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) am Brookhaven National Laboratory auf Long Island in den USA, in denen aus vielen Elementarteilchen zusammengesetzte Atomkerne aufeinanderprallen. Stattdessen sollen im EIC Elektronen, die keine innere Struktur besitzen, mit Protonen und Neutronen kollidieren. So sind weniger Teilchen an den Wechselwirkungen beteiligt. Wissenschaftler können damit die Vorgänge besser aufschlüsseln und einen ungetrübteren Blick ins Innere der Nukleonen werfen.

Der EIC gehört für die Kernphysiker in den USA zu den Projekten mit der höchsten Priorität. Sein voraussichtlicher Standort wäre entweder ebenfalls am Brookhaven National Laboratory oder an der Thomas Jefferson National Accelerator Facility in Newport News. Wenn das Projekt genehmigt wird, könnte der EIC bereits in den 2030er Jahren in Betrieb gehen. Die Forscher wollen mit der Maschine ergründen, wie die individuellen Spins und Massen der Quarks und Gluonen zusammen mit der Energie ihrer kollektiven Bewegung die Spins und die Massen von Protonen und Neutronen bedingen.

Der EIC soll noch weitere Fragen beantworten: Sind Quarks und Gluonen in Nukleonen gleichförmig verteilt, oder verdichten sie sich? Wie schnell bewegen sie sich? Welche Rolle spielen ihre Wechselwirkungen beim Zusammenhalt der Protonen und Neutronen in einem Atomkern? Die Messungen am EIC werden eine Menge Informationen

darüber liefern, wie die grundlegenden Bausteine der Materie miteinander wechselwirken.

Physiker verstehen heute ziemlich gut, wie Objekte aus Atomen aufgebaut sind und wie sich daraus ihre Eigenarten ableiten. Ein großer Teil unseres modernen Lebens basiert auf diesen Erkenntnissen. Doch bei Quarks und Gluonen ist das anders. Die aus ihnen bestehenden Nukleonen sind viel kleiner als Atome, und schon deshalb ist es bedeutend schwieriger, sie zu untersuchen. Außerdem ergeben sich die Eigenschaften der Nukleonen aus dem kollektiven Verhalten von Quarks und Gluonen. Es handelt sich um so genannte emergente Phänomene – um das Ergebnis einer Vielzahl komplizierter Wechselwirkungen, die es uns bislang unmöglich machen, aus dem Zusammenspiel der Einzelkomponenten auf das Gesamtsystem zu schließen.

Austauschfreudige Vermittler ganz ohne Einzelgänger

Die Theorie dieser Wechselwirkungen ist die Quantenchromodynamik (QCD). Sie wurde Ende der 1960er und Anfang der 1970er Jahre entwickelt und ist Teil des als Standardmodell bezeichneten Theoriegebäudes der Teilchenphysik. So wie die elektromagnetische Kraft zwischen elektrisch geladenen Teilchen durch Photonen vermittelt wird, so sind in der QCD die Gluonen Überträgerteilchen der Kraft, welche die Nukleonen zusammenhält. Die Ladung dieser so genannten starken Wechselwirkung heißt hier Farbe. Die Quarks tragen eine »Farbladung« und wechselwirken miteinander über den Austausch von Gluonen. Beim Elektromagnetismus sind die Photonen selbst elektrisch neutral, besitzen also keine Ladung. Gluonen hingegen tragen eine Farbladung.

Deshalb können diese Überträgerteilchen untereinander wechselwirken, indem sie weitere Gluonen austauschen. Das erzeugt eine Lawine möglicher Kopplungen – und macht Berechnungen schnell extrem kompliziert. Hinzu kommt eine weitere bedeutsame Eigenart der QCD: Die starke Kraft nimmt mit dem Abstand der Quarks zu. Beim Elektromagnetismus ist es umgekehrt, hier sinkt die Kraft zwischen geladenen Teilchen bei wachsender Distanz. Innerhalb eines Nukleons ist die starke Kraft bei sehr kleinen Abständen so gering, dass sich die Quarks wie freie Teilchen verhalten. Die Entdeckung dieser seltsamen Konsequenz der QCD brachte den Physikern David Gross, David Politzer und Frank Wilczek 2004 den Nobelpreis ein. Wenn sich Quarks allerdings voneinander entfernen, wächst die Anziehung zwischen ihnen rapide. Sie bleiben dadurch gewissermaßen im Nukleon eingeschlossen. Wegen dieses Confinements (englisch für Eingesperrtsein) lässt sich niemals ein einzelnes Quark oder Gluon außerhalb eines Protons oder Neutrons finden.

Wissenschaftler können die Effekte der QCD berechnen, solange sich die Quarks nahe beieinander befinden und entsprechend schwach miteinander wechselwirken. Doch wenn die Quarks weiter voneinander entfernt sind, dann werden die Kräfte zu stark und die Theorie zu komplex, um noch nützlich zu sein. Das passiert gerade bei Abständen von der Größenordnung des Protonenradius.

Für grundlegende Fortschritte beim Verständnis der Welt der Quarks und Gluonen müssen wir tiefer in die Nukleonen hineinschauen. Anfang des 20. Jahrhunderts haben Physiker einen Weg gefunden, Atome zu sehen. Dazu durchleuchtet man eine Probe mit Röntgenstrahlen und untersucht das entstehende Interferenzmuster auf einem dahinter befindlichen Detektor. So lässt sich die aus den Atomen gebildete Kristallstruktur des Probenmaterials erkennen. Das Verfahren funktioniert nur, weil die Wellenlänge der Röntgenstrahlen kleiner ist als die Atome. Damit lassen sich Strukturen auf der Skala atomarer Abstände im Bereich von Nanometern (10^{-9} Metern) abbilden.

Auf ähnliche Weise sind Physiker vor etwa 50 Jahren in die Welt der Quarks vorgedrungen. Sie haben Elektronen bei Kollisionen mit Protonen »tiefinelastisch« gestreut (englisch: deep inelastic scattering, DIS). Bei dem Verfahren prallt ein Elektron auf ein Proton, ein Neutron oder einen größeren Atomkern und tauscht dabei mit dem Stoßpartner ein so genanntes virtuelles Photon aus. Dieses Teilchen ist nicht real, sondern erscheint schnell und verschwindet sofort wieder infolge der nur quantenmechanisch zu beschreibenden Wechselwirkung. Aber es vermittelt eine Kraft, die das Elektron zur Seite hin ablenkt. Die Forscher vermessen dann sorgfältig die Energie und den Winkel des gestreuten Elektrons und erhalten so Informationen über das Objekt, auf das es getroffen ist (siehe »Blick in den Atomkern«, S. 68/69).

Die Wellenlänge des virtuellen Photons bei DIS-Experimenten liegt in der Größenordnung von Femtometern, 10^{-15} Metern. Das entspricht etwa dem Durchmesser des Protons. Je energiereicher die Kollision ist, desto kleiner wird die Wellenlänge des virtuellen Photons – und desto feinere Strukturen lassen sich mit der Methode sichtbar machen. Bei ausreichender Energie prallt das Elektron nicht mehr am Proton als Ganzem, sondern an einem der Quarks oder Gluonen in dessen Innerem ab. Das erlaubt Forschern einen Blick in die Struktur des Protons.

Das erste DIS-Experiment fand 1968 am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in Zusammenarbeit mit dem

AUF EINEN BLICK
MYSTERIÖSER ZUSAMMENSCHLUSS

1 Protonen und Neutronen erhalten ihre Eigenschaften durch komplizierte Wechselwirkungen ihrer Bausteine, der Quarks und Gluonen. Physiker verstehen nur zum Teil, was dabei vor sich geht.

2 Beim Versuch, immer genauer hinzusehen, entstehen umso mehr Gluonen, je größer die Energie der Untersuchung wird. Theoretiker vermuten am Ende der Kettenreaktion einen neuen Materiezustand.

3 Ein geplanter Teilchenbeschleuniger in den USA, der Electron-Ion Collider, soll Elektronen auf Atomkerne schießen und beispiellose Einsichten in deren Innenleben gewähren.



FLOTO+WARNER



BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

Starke Magnete (hellblau, links) halten die gebündelten Elektronen am Jefferson Lab auf ihren Bahnen. Im Tunnel am Brookhaven Lab (rechts) werden Protonen und schwere Ionen beschleunigt.

Massachusetts Institute of Technology (MIT) statt. Es lieferte erstmals Hinweise auf die Existenz von Quarks und brachte den Projektleitern 1990 den Physik-Nobelpreis ein. Ähnliche Experimente am CERN zeigten, dass sich die Quarks in freien Protonen und Neutronen anders verhalten als in Atomkernen. Entgegen den Vermutungen der Forscher ergab sich der Spin von Protonen und Neutronen nicht aus den Spins ihrer Quarks. Die Entdeckung wurde daraufhin Spin-Krise genannt.

Überraschend quirliges Innenleben

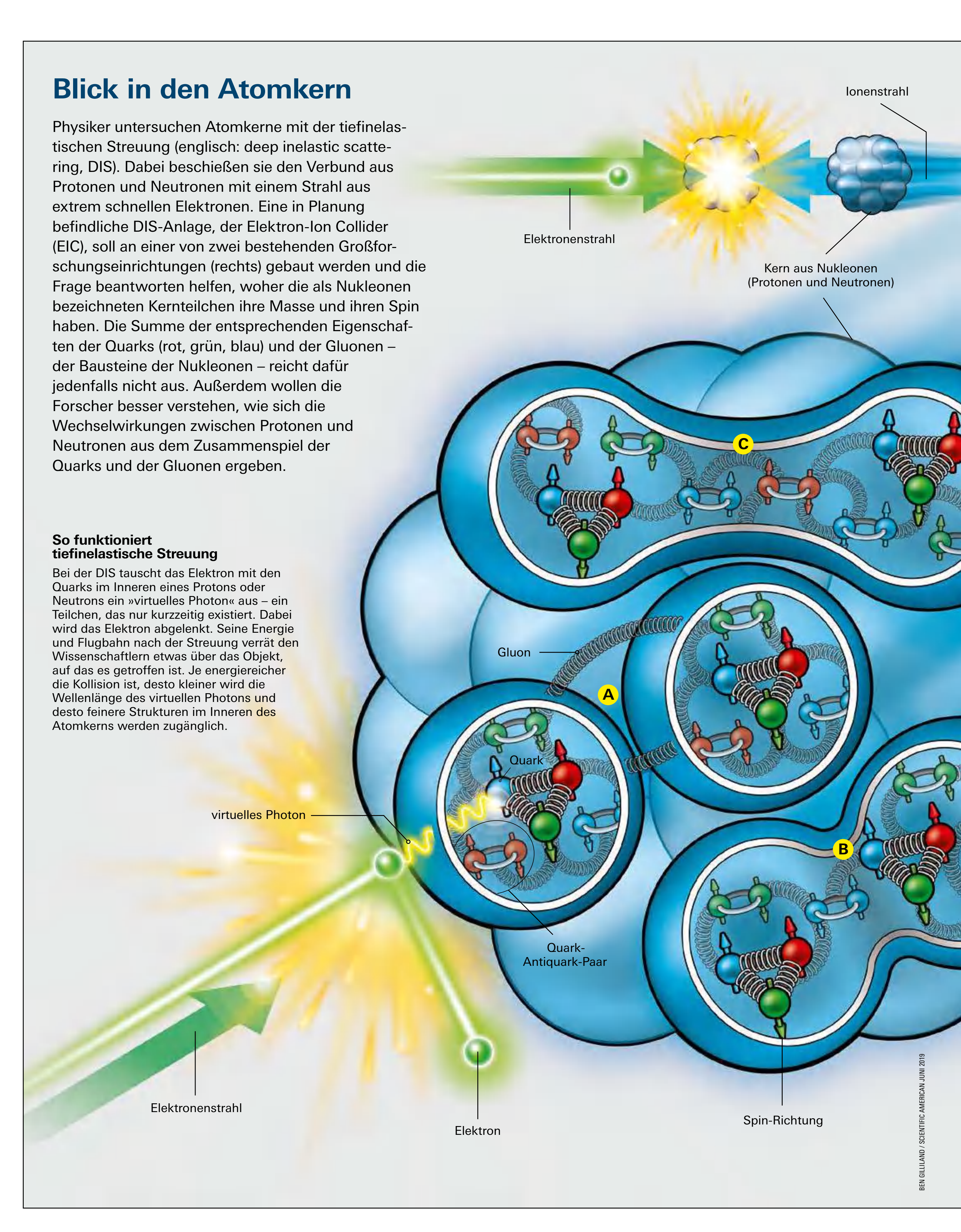
Die erste DIS-Anlage, in der sowohl die Elektronen als auch die Protonen vor ihrer Kollision beschleunigt wurden, war der von 1992 bis 2007 betriebene Hadron-Electron Ring Accelerator (HERA) am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY). Die HERA-Experimente zeigten, dass Protonen und Neutronen keineswegs die erwarteten einfachen Systeme aus drei Quarks sind. Vielmehr tauchen viele Quarks und Gluonen permanent auf und verschwinden gleich wieder. Trotz dieser Einsichten in die Struktur der Nukleonen war keine Lösung der Spin-Krise in Sicht. Zudem ließ sich das Verhalten von Quarks und Gluonen in größeren Atomkernen an HERA nicht untersuchen.

Die Seltsamkeit der Quantenmechanik verkompliziert die Beobachtungen auf dieser Skala zusätzlich, denn dieser Theorie zufolge sind subatomare Teilchen lediglich verschwommene Wahrscheinlichkeitswolken. Die Objekte existieren nicht länger zu genau bekannten Zeitpunkten in definierten Zuständen an eindeutigen Orten. Stattdessen können Quarks in einer unermesslichen Anzahl von Konfigurationen gleichzeitig vorliegen. Hinzu kommt das quantenmechanische Phänomen der Verschränkung: Zwei Teilchen verbinden sich manchmal so miteinander, dass ihr Schicksal auch dann noch voneinander abhängt, wenn sie völlig voneinander getrennt sind.

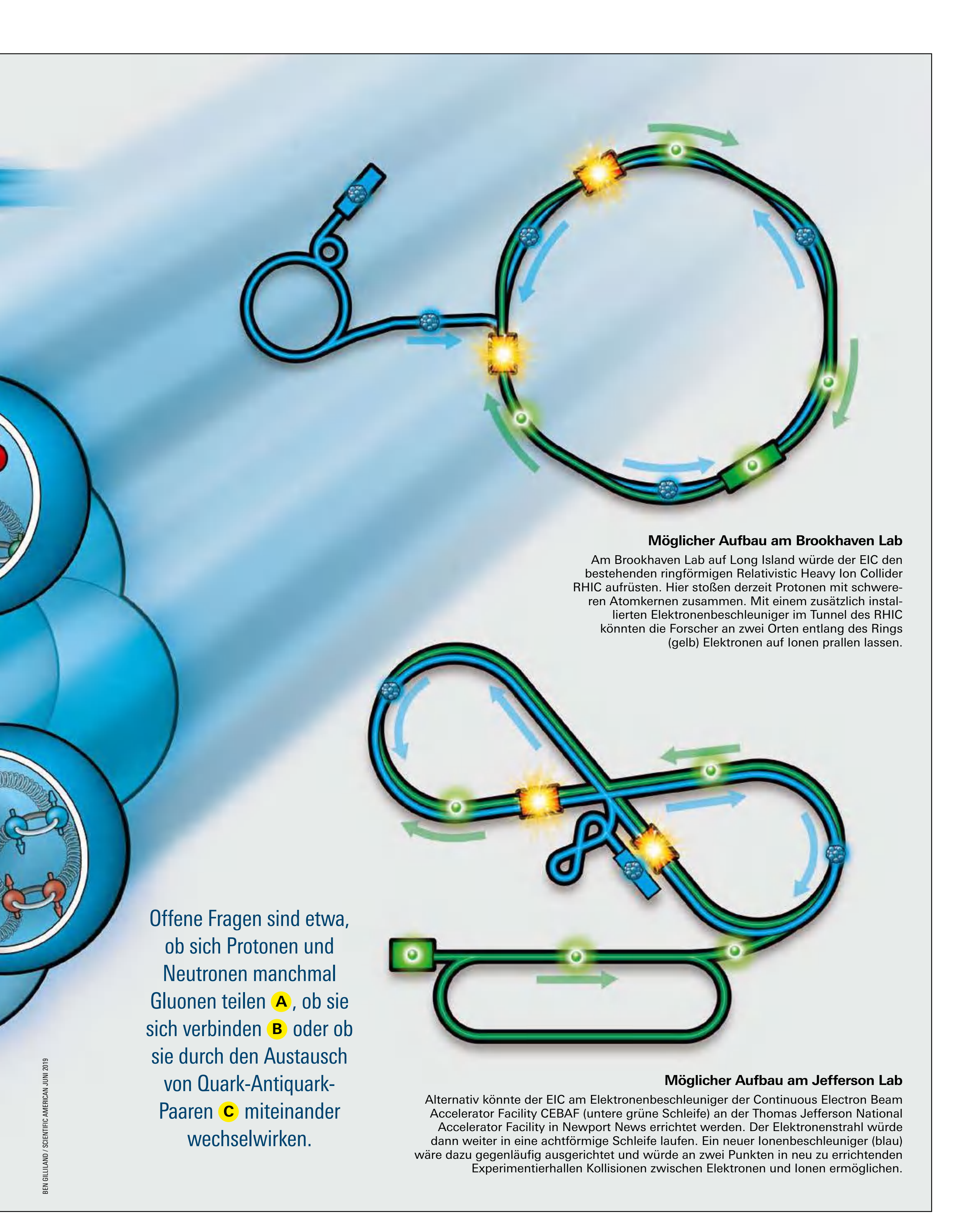
Die Verschränkung stellt für subatomare Beobachtungen ein fundamentales Problem dar. Es besteht nämlich immer die Gefahr, dass die Quarks und Gluonen, die wir betrachten wollen, sich mit dem Mittel unserer Untersuchung verschränken. Das sind beim DIS die virtuellen Photonen. Wie sollen wir definieren, was wir mit der Struktur der Nukleonen meinen, wenn diese davon abhängt, wie und womit wir sie durchleuchten?

In den 1960er und 1970er Jahren hat die Theorie der QCD gewaltige Fortschritte gemacht und einen Weg aufgezeigt, wie sich bei DIS-Experimenten Ziel und Mittel der Untersuchung voneinander trennen lassen: mit der »Faktorisierung«. Bei ausreichend hohen Energien dürfen die Wissenschaftler in der Praxis unter bestimmten Umständen die Verschränkung ignorieren. Letztlich können sie die Struktur des Protons so zumindest in einer Dimension beschreiben. Das heißt, DIS-Experimente liefern entlang der Bewegungsrichtung eines Protons die Wahrscheinlichkeit, mit der jedes einzelne Quark im Inneren einen bestimmten Anteil zum Gesamtimpuls beiträgt.

In jüngerer Zeit haben es theoretische Fortschritte ermöglicht, einen Schritt weiter zu gehen und die innere Struktur der Nukleonen in mehr als einer Dimension zu



Blick in den Atomkern
Physiker untersuchen Atomkerne mit der tiefinelastischen Streuung (englisch: deep inelastic scattering, DIS). Dabei beschießen sie den Verbund aus Protonen und Neutronen mit einem Strahl aus extrem schnellen Elektronen. Eine in Planung befindliche DIS-Anlage, der Elektron-Ion Collider (EIC), soll an einer von zwei bestehenden Großforschungseinrichtungen (rechts) gebaut werden und die Frage beantworten helfen, woher die als Nukleonen bezeichneten Kernteilchen ihre Masse und ihren Spin haben. Die Summe der entsprechenden Eigenschaften der Quarks (rot, grün, blau) und der Gluonen – der Bausteine der Nukleonen – reicht dafür jedenfalls nicht aus. Außerdem wollen die Forscher besser verstehen, wie sich die Wechselwirkungen zwischen Protonen und Neutronen aus dem Zusammenspiel der Quarks und der Gluonen ergeben.
So funktioniert tiefinelastische Streuung
Bei der DIS tauscht das Elektron mit den Quarks im Inneren eines Protons oder Neutrons ein »virtuelles Photon« aus – ein Teilchen, das nur kurzzeitig existiert. Dabei wird das Elektron abgelenkt. Seine Energie und Flugbahn nach der Streuung verrät den Wissenschaftlern etwas über das Objekt, auf das es getroffen ist. Je energiereicher die Kollision ist, desto kleiner wird die Wellenlänge des virtuellen Photons und desto feinere Strukturen im Inneren des Atomkerns werden zugänglich.
Ionenstrahl
Elektronenstrahl
Kern aus Nukleonen (Protonen und Neutronen)
C
Gluon
A
Quark
virtuelles Photon
B
Quark-Antiquark-Paar
Elektronenstrahl
Elektron
Spin-Richtung
BEN GILLILAND / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2019



Möglicher Aufbau am Brookhaven Lab

Am Brookhaven Lab auf Long Island würde der EIC den bestehenden ringförmigen Relativistic Heavy Ion Collider RHIC aufrüsten. Hier stoßen derzeit Protonen mit schwereren Atomkernen zusammen. Mit einem zusätzlich installierten Elektronenbeschleuniger im Tunnel des RHIC könnten die Forscher an zwei Orten entlang des Rings (gelb) Elektronen auf Ionen prallen lassen.

Möglicher Aufbau am Jefferson Lab

Alternativ könnte der EIC am Elektronenbeschleuniger der Continuous Electron Beam Accelerator Facility CEBAF (untere grüne Schleife) an der Thomas Jefferson National Accelerator Facility in Newport News errichtet werden. Der Elektronenstrahl würde dann weiter in eine achtförmige Schleife laufen. Ein neuer Ionenbeschleuniger (blau) wäre dazu gegenläufig ausgerichtet und würde an zwei Punkten in neu zu errichtenden Experimentierhallen Kollisionen zwischen Elektronen und Ionen ermöglichen.

Offene Fragen sind etwa, ob sich Protonen und Neutronen manchmal Gluonen teilen (A), ob sie sich verbinden (B) oder ob sie durch den Austausch von Quark-Antiquark-Paaren (C) miteinander wechselwirken.

BEN GILLILAND / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2019

beschreiben. Das heißt, die Physiker können nicht nur den Beitrag der Quarks und Gluonen zum Impuls in Vorwärtsrichtung berechnen, sondern auch die seitliche Bewegung dieser Teilchen.

Der EIC soll den Forschern erstmals dreidimensionale Karten des Inneren von Protonen und Neutronen liefern. Der Schlüsselaspekt des EIC im Vergleich zu früheren DIS-Experimenten ist dabei die große Anzahl von Zusammenstößen: Pro Minute kollidieren im EIC 100- bis 1000-mal so viele Teilchen wie bei HERA. Darüber hinaus führt ihre hohe Energie zu einem Auflösungsvermögen, das einigen Hundertsteln des Protonendurchmessers entspricht. Damit lassen sich Bereiche untersuchen, in denen eine große Anzahl von Quarks und Gluonen auftauchen. Sie tragen jeweils nur etwa 0,01 Prozent zum Bewegungsimpuls des Protons bei.

Zudem ist beim EIC die Ausrichtung der Teilchenspins in den Strahlen kontrollierbar. Dadurch wird es auch möglich, zu untersuchen, wie sich der Spin des Protons aus den QCD-Wechselwirkungen der Quarks und Gluonen ergibt. Wenn wir all diese Informationen in unsere modernen theoretischen Modelle einfließen lassen, sollten die Messungen ein Bild davon ergeben, wie das Proton aus Quarks und Gluonen aufgebaut ist.



CLAUDIA MARCELLONI UND MAXIMILIEN BRICE, CERN

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/teilchenbeschleuniger**

Dabei gibt es viele offene Fragen: Sind die Bestandteile gleichmäßig im Proton verteilt – oder verdichten sie sich an manchen Stellen? Tragen einige von ihnen mehr zur Masse und zum Spin bei als andere? Und welche Rolle spielen Quarks und Gluonen beim Zusammenhalt von Nukleonen im Atomkern?

Eine der größten Unbekannten in unserer Vorstellung von der Struktur der Nukleonen ist der Einfluss, den unsere Untersuchung mit hoher Auflösung auf deren Bausteine hat. Denn dabei können seltsame Dinge geschehen. Die QCD sagt voraus, dass es bei immer höherer Energie zugleich immer mehr Gluonen gibt. Quarks können Gluonen erzeugen und diese Gluonen ihrerseits weitere – es kommt zu einer Kettenreaktion. Man findet umso mehr von ihnen, je genauer man hinschaut.

Allerdings kann das noch nicht die ganze Wahrheit sein. Denn würde die Anzahl von Gluonen in Atomen gegen unendlich streben, nähme die Materiemenge unbegrenzt zu. Die Untersuchungen mit den bisherigen Beschleunigern wie HERA deuten jedoch auf eine Art Sättigung hin. In so einem Zustand kann ein Proton schlicht keine weiteren Gluonen mehr beherbergen. Stattdessen rekombinieren einige von ihnen und beschränken mit dieser Vereinigung das weitere Wachstum. Die Physiker haben bislang jedoch keinen eindeutigen Beweis für die Sättigung finden können, und es ist auch unklar, an welcher Stelle sie eintritt. Manche Berechnungen lassen vermuten, dass sie zu einem neuen Materiezustand führt, einem »Farb-Glas-Kondensat« mit ganz außergewöhnlichen Eigenschaften. So könnte die Energiedichte der Gluonen das 50- bis 100-Fache von Neutronensternen erreichen. Schwere Atomkerne statt Protonen sollen helfen, in den Bereich der höchstmöglichen Gluonendichte vorzustoßen.

Ein Plan, zwei mögliche Standorte – und viele Herausforderungen

Große Unterstützung erfuhren die Bestrebungen für den neuen Beschleuniger 2015 bei einer Konferenz US-amerikanischer Kernphysiker, die der Langzeitplanung gewidmet war. Das US-Energieministerium forderte 2017 eine unabhängige Evaluierung der Pläne durch eine nichtstaatliche Organisation, die National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Im Juli 2018 legte das Komitee seinen Bericht vor und nannte die wissenschaftliche Begründung des EIC überzeugend und zeitgemäß.

Für den Bau gibt zwei grundsätzliche Möglichkeiten. Bei der ersten handelt es sich um eine Aufrüstung des RHIC in Brookhaven. Bei dieser als »eRHIC« diskutierten Variante würde ein zusätzlicher Elektronenstrahl im bereits vorhandenen RHIC-Tunnel installiert. Dieser könnte dann an zwei unterschiedlichen Punkten mit einem der Ionenstrahlen des RHIC kollidieren (siehe obere Grafik S. 69). Die zweite Option würde den Elektronenstrahl der Continuous Electron Accelerator Facility CEBAF am Jefferson Lab nutzen. In dieser als Jefferson Lab EIC, kurz JLEIC, bezeichneten Ausführung würde der CEBAF-Strahl in einen neuen, benachbarten Tunnel gelenkt werden und dort mit Ionen kollidieren.

Bei beiden Varianten sind Kollisionen mit schweren Atomkernen möglich, darunter denen von Gold, Blei und Uran. Damit möchten die Wissenschaftler untersuchen, wie sich die Verteilung von Quarks und Gluonen verändert, wenn die Nukleonen Teil größerer Kerne sind. So wüssten wir beispielsweise gern, ob sich zwei Protonen Gluonen gewissermaßen teilen können.

Der Bau des EIC würde große Herausforderungen bedeuten: Die Anlage benötigt stark gebündelte Elektronen-, Protonen- und Ionenstrahlen hoher Intensität und über einen weiten Energiebereich. Zudem muss die Maschine Teilchenstrahlen liefern, in denen die Spins einheitlich ausgerichtet sowie kontrolliert und manipuliert werden können.

Die technischen Innovationen, die dafür nötig sind, dürften sich über die Kern- und Teilchenphysik hinaus etwa auch auf die Medizin und die Materialwissenschaften auswirken. Doch vor allem kämen wir mit dem EIC endlich zu einem vollständigeren Verständnis der verborgenen Welt der Quarks und Gluonen. ◂

QUELLE

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine: An assessment of U.S.-based Electron-Ion Collider science. National Academies Press, 2018



Geschenktipps zum Weihnachtsfest

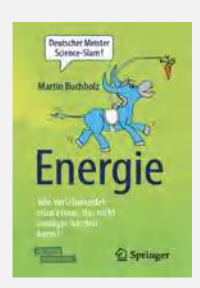
Ich will es wissen - Springer Sachbücher und Ratgeber



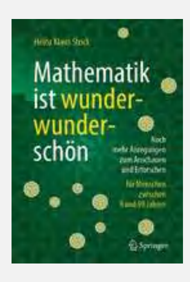
2019, X, 137 S. 72 Abb. in Farbe.
Book + eBook. Geb.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,46 | *sFr 22,00
ISBN 978-3-662-58368-5
€ 14,99 | *sFr 17,50
ISBN 978-3-662-58369-2 (eBook)



2019, XXVI, 383 S. 125 Abb. in Farbe.
Book + eBook. Geb.
€ (D) 22,98 | € (A) 23,53 | *sFr 25,00
ISBN 978-3-662-58642-6
€ 16,99 | *sFr 20,00
ISBN 978-3-662-58643-3 (eBook)



2., erweiterte und korrigierte Aufl. 2019, VIII, 260 S. 58 Abb., 46 Abb. in Farbe. Brosch.
€ (D) 18,00 | € (A) 18,43 | *sFr 19,50
ISBN 978-3-662-56771-5
€ 12,99 | *sFr 15,50
ISBN 978-3-662-56772-2 (eBook)



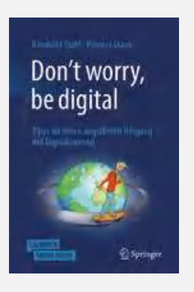
2019, XI, 339 S. 477 Abb., 463 Abb. in Farbe. Brosch.
€ (D) 17,99 | € (A) 18,49 | *sFr 20,00
ISBN 978-3-662-58100-1
€ 12,99 | *sFr 16,00
ISBN 978-3-662-58101-8 (eBook)



2. Aufl. 2018, XVI, 341 S. 645 Abb., 562 Abb. in Farbe Geb.
€ (D) 29,99 | € (A) 30,83 | *sFr 33,50
ISBN 978-3-662-57323-5
€ 22,99 | *sFr 26,50
ISBN 978-3-662-57324-2 (eBook)



3. Aufl. 2019, XVI, 332 S. 1 Abb Geb.
€ (D) 29,99 | € (A) 30,83 | *sFr 33,50
ISBN 978-3-662-58412-5
€ 22,99 | *sFr 26,50
ISBN 978-3-662-58413-2 (eBook)



2019, VIII, 146 S. 53 Abb. in Farbe. Book + eBook. Brosch.
€ (D) 14,99 | € (A) 15,35 | *sFr 16,50
ISBN 978-3-662-59323-3
€ 9,99 | *sFr 13,00
ISBN 978-3-662-59324-0 (eBook)



2018, XXI, 179 S. 11 Abb. Book + eBook. Brosch.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,46 | *sFr 22,00
ISBN 978-3-662-56775-3
€ 14,99 | *sFr 17,50
ISBN 978-3-662-56776-0 (eBook)



2019, XII, 209 S. 18 Abb., 17 Abb. in Farbe. Book + eBook. Geb.
€ (D) 22,99 | € (A) 23,54 | *sFr 25,00
ISBN 978-3-662-59227-4
€ 16,99 | *sFr 20,00
ISBN 978-3-662-59228-1 (eBook)



2019, XIII, 562 S. 287 Abb., 1 Abb. in Farbe.
Book + eBook. Brosch.
€ (D) 24,99 | € (A) 25,58 | *sFr 27,00
ISBN 978-3-662-57292-4
€ 19,99 | *sFr 21,50
ISBN 978-3-662-57293-1 (eBook)



2., erweiterte Aufl. 2019, XI, 274 S. 23 Abb., 2 Abb. in Farbe. Brosch.
€ (D) 19,99 | € (A) 20,55 | *sFr 22,50
ISBN 978-3-662-58419-4
€ 14,99 | *sFr 18,00
ISBN 978-3-662-58420-0 (eBook)

Ihre Vorteile in unserem Online Shop:

Über 280.000 Titel aus allen Fachgebieten | eBooks sind auf allen Endgeräten nutzbar | Kostenloser Versand für Printbücher weltweit

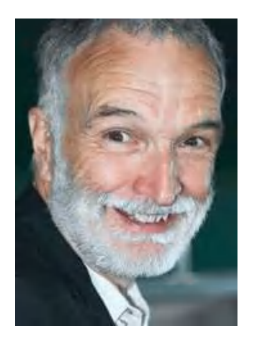
€ (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7 % für Printprodukte bzw. 19 % MwSt. für elektronische Produkte. € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10 % für Printprodukte bzw. 20% MwSt. für elektronische Produkte.
Die mit * gekennzeichneten Preise sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.

Jetzt bestellen auf springer.com/angebot oder in Ihrer Buchhandlung

Part of SPRINGER NATURE

A79964

SCHLICHTING!
ZWITSCHERN AUF DÜNNEM EIS



Wer auf einer zugefrorenen Eisfläche Schlittschuh läuft oder Steine hüpfen lässt, erzeugt manchmal hohe, lang gezogene Töne, die nicht von dieser Welt zu stammen scheinen.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

spektrum.de/artikel/1681238

Das Eis, es muß doch tragen.
Wer weiß!
Friedrich Wilhelm Güll (1812–1879)

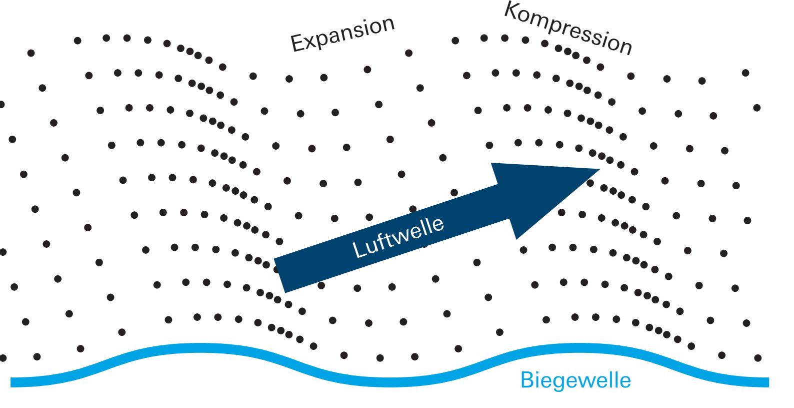
Ruhige Gewässer laden dazu ein, flache Steine über das Wasser springen zu lassen (**Spektrum** April 2016, S. 46). Wer dieses »Ditschen« bei einem zugefrorenen See versucht, wird mit einem anderen Phänomen belohnt: Angeregt durch die Stöße erzeugt die Eisschicht gespenstisch anmutende Töne, die ihresgleichen suchen. Am ehesten noch ist das schrill zwitschernde Geräusch mit dem Sound von Laserwaffen in Sciencefiction-Filmen zu vergleichen.

Physikalisch haben wir es dabei mit einem Beispiel so genannter akustischer Dispersion zu tun. Normalerweise enthalten Schallwellen unterschiedliche Frequenzen, also hohe und tiefe Töne. In der Luft bewegen sich die entsprechenden Teilwellen mit derselben Geschwindigkeit fort und kommen zur selben Zeit in unseren Ohren an.

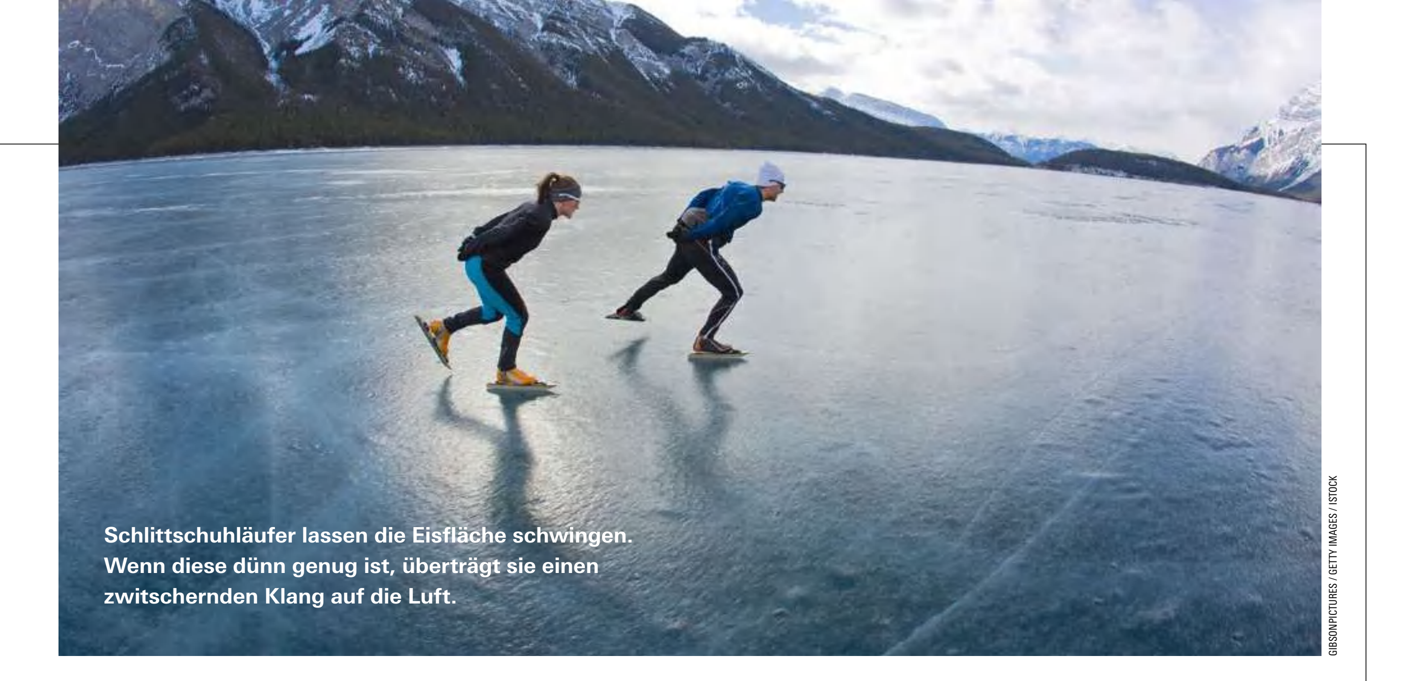
Das zwitschernde Eis gibt die akustische Kostprobe einer fremden Welt, in der das nicht so ist. Denn in vielen anderen Fällen, etwa wenn der Schall durch feste Körper wie eben Eis geht, bewegen sich die Teilwellen hoher Frequenzen schneller. Die höheren Töne eilen deshalb den tieferen davon, und der Schall wird über die Distanz in ganz unvertrauter Weise auseinandergezogen. Wer sich fernab vereister Gewässer einen ungefähren Eindruck von diesem Zwitschern verschaffen will, kann mit einem harten Gegenstand auf eine lange metallene Schraubenfeder (»Slinky«) oder ein gespanntes Drahtseil schlagen. Hier breitet sich der Schall vom getroffenen Punkt ausgehend ähnlich aus.

Um das akustische Phänomen auf dem Eis überhaupt wahrzunehmen, muss man weit genug von den Stellen entfernt sein, an denen der Stein landet. Nur so können sich die unterschiedlich schnell wandernden Teilwellen verschiedener Frequenzen ausreichend trennen. Beim Ditschen passiert das automatisch, wenn der geworfene Stein weiter wegspringt.

Für die gefrorene Fläche eines bestimmten Gewässers zu einer gewissen Zeit ist die dominierende Tonhöhe immer dieselbe und unabhängig davon, wie weit man den Stein wirft oder welche lokalen akustischen Beson-



Die Eisschicht krümmt sich periodisch als Biegewelle, welche die darüberliegende Luft auseinanderzieht oder staucht. Nur wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in beiden Medien zueinanderpassen, überlagern sich die Luftschwingungen zu einem wahrnehmbaren Ton, der sich zum Ufer fortpflanzt.


Schlittschuhläufer lassen die Eisfläche schwingen. Wenn diese dünn genug ist, überträgt sie einen zwitschernden Klang auf die Luft.

GIBSONPICTURES / GETTY IMAGES / ISTOCK

derheiten noch im Spiel sein mögen, beispielsweise durch Brüche. Aber wer sich mit dem Ditschen auf Eis über längere Zeit vertraut macht, wird bemerken, dass die Tonhöhe auf andere Weise von der Eisschicht abhängt: Eine dünne bringt einen hohen Klang hervor, dickere einen tieferen.

Diesen Zusammenhang kennen auch erfahrene Schlittschuhläufer. Wer auf weniger als zehn Zentimeter starken Eisschichten unterwegs ist, hört ebenfalls das Gezwitscher des Eises – allerdings stets nicht das selbst ausgelöste, sondern das von weiter entfernten Läufern. Die unverwechselbare Melodie gibt indirekt Auskunft über die Tragfähigkeit. Steigt die dominierende Frequenz über einen kritischen Wert, dann sollte das eher wie Alarmglocken in den Ohren klingen. Das ist in etwa dann der Fall, wenn die Dicke sechs Zentimeter unterschreitet und das Eis unverzüglich verlassen werden muss. Mit einem sehr feinen und trainierten Gehör kann man das im kritischen Bereich zentimetergenau erkennen, aber bereits für Gelegenheitsläufer ist es unter Umständen hilfreich, den Zusammenhang von Eisdicke und Tonhöhe zu kennen.

Bei Schlittschuhläufern auf sehr dünnem Eis kann man teilweise sogar sehen, dass sich die Eisschicht auf und ab bewegt. Sie wird zu Biegeschwingungen angeregt, die letztlich die Klänge erzeugen. Das Eis ist näherungsweise eine Platte unendlicher Ausdehnung – bei großen Seen keine schlechte Approximation. Einerseits erleichtert das die mathematische Beschreibung. Allerdings liegt die Eisplatte auf einem Wasserkörper auf, der bei jeder Auslenkung mitbewegt werden muss. Das macht andererseits die Verhältnisse wieder komplizierter als bei einer schwingenden Platte, die auf beiden Seiten nur von Luft begrenzt ist.

Hinzu kommt: Für wahrzunehmende Töne müssen die periodischen Krümmungen der Eisplatte auf die Luft übertragen werden. Denn Schall ist physikalisch gesehen nichts anderes als Luft, die im akustischen Frequenzbereich schwingt. Es ist jedoch alles andere als selbstverständlich, dass das Eis die Vibration über die Luft bis zu unseren Ohren befördern kann. Denn lokale Luftströmungen gleichen viele von der Schwingung hervorgerufene Luftdruckschwankungen in unmittelbarer Nähe der Platte sofort wieder aus. Physiker sprechen vom akustischen Kurzschluss. Erst ab einer bestimmten Frequenz wird eine intensive Schallwelle abgestrahlt. Dazu muss die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle der Eisplatte so groß sein wie die Schallgeschwindigkeit in der Luft. Das passiert bei der so genannten Koinzidenzfrequenz. Dann stößt die Oberfläche die einzelnen Luftteilchen im genau passenden Tempo an, so dass deren Dichteschwankungen sich überlagern und als Schallfront zum Ufer laufen (siehe Illustration links).

Für den akustischen Bereich liegen die Bedingungen im Allgemeinen bei einer weniger als zehn Zentimeter dicken Eisfläche vor. Zwar regen die Einwirkungen auf dem Eis viele Frequenzen an, aber nur diejenigen oberhalb der Koinzidenzfrequenz sind letztlich hörbar. Wer beim Schlittschuhlaufen genauer hinhört, stellt fest, dass die Melodie nicht kontinuierlich fortdauert. Sie wird stattdessen wie durch kleine Glockenschläge immer wieder neu angeregt, während sich die Läufer abstoßen.

Die außerirdisch wirkenden Töne kommen auch natürlicherweise zu Stande, etwa wenn die Eisschicht durch Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht an einigen Stellen reißt. Solche Ursachen lassen sich oft nicht gleich erkennen, und das macht die Situation umso gespenstischer.

QUELLE

Lundmark, G.: Skating on thin ice – and the acoustics of infinite plates. The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Den Haag, 2001

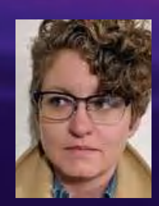
WEBLINK

https://youtu.be/OC7_zpyqCrU?t=33

Das Video führt das Geräusch und dessen Entstehung vor.

RAUMFAHRT
SCHUSS INS BLAUE

Traditionelle Antriebstechniken befördern Raumsonden weder besonders schnell noch sehr weit ins All. Einige Wissenschaftler hoffen auf eine Revolution – und verfolgen dafür exotische Ideen an den Grenzen der bekannten Physik.



Sarah Scoles ist Wissenschaftsjournalistin. Sie schreibt regelmäßig über Raumfahrtthemen und lebt in Denver.

⏩ spektrum.de/artikel/1681240

2012 kehrte Heidi Fearn, Physikprofessorin an der California State University im US-amerikanischen Fullerton, nach einem Sabbatical an ihren Arbeitsplatz zurück. Zu ihrer Überraschung war zwischenzeitlich im benachbarten Labor ein Mann untergebracht worden, den sie bereits flüchtig kannte: James F. Woodward, Professor für Wissenschaftsgeschichte und außerordentlicher Professor für Physik. Die Universität hatte sein bisheriges Büro für eine neue Abteilung gebraucht und ihn an diesen bis dahin kaum genutzten Ort versetzt.

Anfangs betrachtete Fearn den alten Mann eher als Eindringling, aber bald änderte sich ihre Einstellung ihm gegenüber. Die Theoretikerin hat sich auf die Quantenoptik spezialisiert, also darauf, wie Licht mit Materie wechselwirkt. Woodwards Interesse hingegen gilt einem Außenseiterthema, nämlich einem hypothetischen Antrieb, mit dem die Menschheit dereinst den interstellaren Raum und die nächsten Sterne erkunden könnte.

»Ich war nicht wirklich davon überzeugt, dass seine Arbeit etwas taugt«, erinnert sich Fearn. Beim täglichen Vorbeigehen an Woodwards Labor erschien ihr der dort installierte Versuch eher wie das Demonstrationsexperiment in einer Vorlesung für Erstsemester denn wie ein futuristisches Antriebssystem. Der Aufbau enthielt eine schwingende Masse in einem Metallkäfig auf der einen Seite, Gegengewichte auf der anderen Seite und etliche hin- und herlaufende Drähte. Woodward behauptete, er

Bisher sind interstellare Reisen reine Sciencefiction, doch manche Forscher hoffen: nicht mehr lange.

könne die Masse eines Objekts ein kleines bisschen beeinflussen, indem er dagegen stößt. Während sie sich ändert, entstünde durch geschicktes Ziehen und Schieben zu genau den richtigen Zeitpunkten unter dem Strich Schub.

Woodward zeigte Fearn kleine Ausschläge auf einem Diagramm, die einem solchen Nettoimpuls entsprechen sollten. Fearn hielt zunächst nichts davon. Das änderte sich, während sie täglich am Diagramm vorbeilief. »Mit jedem Mal erschienen mir die Ausschläge klarer zu erkennen«, erinnert sie sich. Schließlich fragte Woodward, ob sie ihm helfen wolle. Sie sagte zu. Seitdem entwickelt das ungleiche Paar gemeinsam den Mach-Effekt-Gravitationsantrieb (MEGA). Dabei bewegen sie sich am äußeren Rand der etablierten Wissenschaft. Trotzdem haben sie inzwischen an Glaubwürdigkeit gewonnen: Drei weitere Labore haben das Experiment nachvollzogen und teilweise ähnliche Effekte gemessen, und MEGA konnte sich zwei heiß umkämpfte Fördertöpfe der NASA sichern.

Die Zuschüsse stammen aus dem NASA Innovative Advanced Concepts Program (NIAC), einer speziellen Abteilung der US-Raumfahrtagentur. Das NIAC unterstützt spekulative Forschungsansätze, die im Erfolgsfall dramati-

AUF EINEN BLICK
MIT UNVERNUNFT ZU DEN STERNEN

1 Antriebe für Raketen und Raumsonden sind bislang auf mitgeführte Treibstoffe angewiesen. Deren Eigengewicht schmälert die mögliche Nutzlast und begrenzt außerdem die Reichweite.

2 Ein Förderprogramm ermuntert Forscher zur Suche nach völlig neuen Methoden der Fortbewegung. Damit soll die Menschheit das All schneller und über das Sonnensystem hinaus erkunden.

3 Die Ideen reichen von Antimaterie- und Kernreaktionen über Hochleistungslaser bis hin zu einem besonders spekulativen Konzept, das Schub allein aus einer relativistisch schwankenden Masse gewinnen soll.

sche Konsequenzen hätten. 2017 und 2018 entfielen rund ein Fünftel der 47 Auszeichnungen auf neuartige Antriebe, die im Vergleich zu herkömmlichen Raketenkonzepten mit weniger Treibstoff in kürzerer Zeit mehr Masse über größere Distanzen befördern sollen. Die Spanne reicht von leicht ungewöhnlichen bis zu höchst exotischen Projekten. Gemeinsam ist allen, dass sie neue Wege gehen.

Antriebe aus dem letzten Jahrhundert

Die NIAC-Förderungen sollen Abhilfe angesichts der Tatsache schaffen, dass sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts bei der Antriebstechnik im Grundsatz relativ wenig getan hat. Die meisten Raumflugkörper verwenden chemische Treibstoffe, gewissermaßen die Weltraumvariante von Benzin. Verschiedene Chemikalien reagieren miteinander und erzeugen heiße Reaktionsprodukte, die sich ausdehnen und mit hoher Geschwindigkeit aus der Brennkammer schießen – Schub entsteht. Das ist die Kraft, mit der sich eine Rakete beim Start nach oben drückt.

Doch dieser Treibstoff allein eignet sich nicht für Reisen zu anderen Sternen oder auch nur für eine schnellere Fortbewegung innerhalb unseres Sonnensystems. Er ist relativ schwer, muss in großen Mengen mitgeführt und bei jeder Bewegung mitbeschleunigt werden. Bei einigen Missionen, wie der Dawn-Raumsonde der NASA, kam stattdessen bereits eine Alternative zum Einsatz: ein so genannter Ionenantrieb. Dabei ist die Energie zur Beschleunigung nicht chemisch im Treibstoff gebunden, sondern stammt aus einem elektromagnetischen Feld, das mit Hilfe von Solarzellen erzeugt wird. Es schießt geladene Teilchen (im Fall von Dawn aus einem Tank mit Xenongas an Bord) mit viel größeren Geschwindigkeiten ins All, als sie bei herkömmlichen Kraftstoffen möglich sind. Aber auch dieses Konzept hat seine Grenzen. »Das Prinzip der elektrischen Antriebe stammt aus den 1950er und 1960er Jahren«, sagt Dan M. Goebel vom Jet Propulsion Laboratory der NASA. »Es ist, als hätte es seitdem praktisch keine grundlegend neuen Ideen mehr gegeben.«

Mit dem NIAC kann die NASA Risikokapital verteilen, um – mit den Worten des NIAC-Programmleiters Jason Derleth – »verrückte« Dinge zu fördern: »Damit meine ich etwas, woran sonst niemand denkt.« Etwas, das um Größenordnungen besser ist als der aktuelle Stand der Technik und das man im heutigen Vokabular der Start-up-Szene



SPENCER LOWELL (SPENCERLOWELL.COM)

»disruptiv« nennen würde. Als Beispiel nennt Derleth die Arbeit von Philip Lubin von der University of California in Santa Barbara. 2015 schlug Lubin vor, einen winzigen Satelliten mit einem »Lichtsegel« auszustatten (das wiederum basiert auf einer älteren Idee). Von der Erde aus sollten leistungsfähige Laser Licht auf das Segel fokussieren. Beim Auftreffen würden die Photonen ihren Impuls darauf übertragen und das Raumschiff beschleunigen.

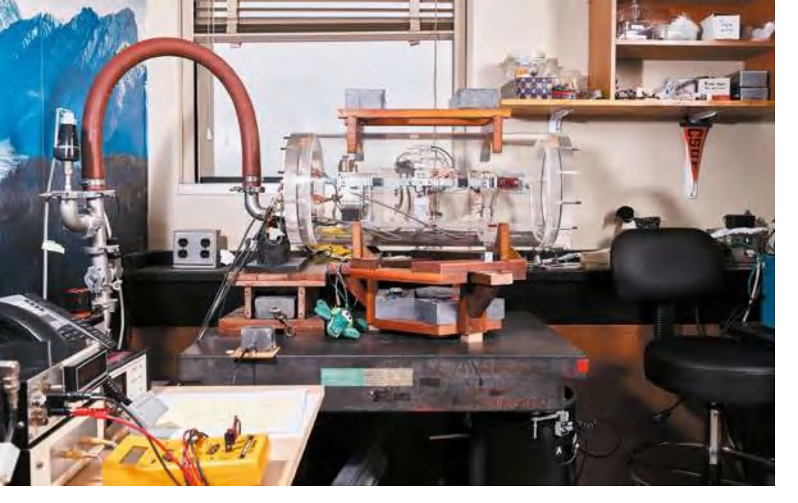
2015 und 2016 gewährte das NIAC Lubin Fördergelder, und er arbeitet inzwischen mit finanzkräftigen Partnern zusammen, um irgendwann solche Raumsonden zum nächsten Sternsystem zu schicken (siehe » Aufbruch nach Alpha-Centauri«, **Spektrum** Juli 2017, S. 62). Das ist ganz im Sinn von Derleth: »Es ist gerade so verrückt, dass es tatsächlich funktionieren könnte«, kommentiert er. »NIAC will sich bis an die Grenze zur Sciencefiction vorwagen, sie aber nicht übertreten.«

Um die Schritte zwischen Wissenschaft und Fiktion zu vermessen, verwendet die NASA ein Bewertungssystem namens Technology Readiness Level (TRL). Der TRL-Wert gibt an, wie ausgereift eine Innovation schon ist. Die Solarmodule auf der Marssonde InSight beispielsweise befinden sich beim höchsten TRL von 9 – sie werden bereits im Weltraum eingesetzt und funktionieren. NIAC hält Ausschau nach den niedrigsten Werten 1 und 2, bei denen gerade einmal die Grundprinzipien untersucht und in hypothetische Anwendungen übersetzt worden sind. Manchmal eignet sich auch ein TRL 3, bei dem die Funktionstüchtigkeit nachgewiesen ist, aber der Weg aus den Laboren bis zum ersten echten Einsatz noch lang ist. In der Regel reichen jedes Jahr etwa 200 Arbeitsgruppen bei der NIAC Vorschläge für die erste Förderphase ein, von denen nur 15 bis 18 eine Zusage bekommen. Dann erhalten die Wissenschaftler 125 000 US-Dollar und neun Monate Zeit, um zu demonstrieren, ob ihre Idee wirklich umsetzbar ist. Wenn das gelingt, können die Forscher Gelder in Höhe von 500 000 Dollar für Phase II beantragen. »Das ist einer der schwierigsten Bewerbungsschritte mit der niedrigsten Erfolgsquote in der Luft- und Raumfahrt«, kommentiert Derleth. »Ich halte diese Leute für die Crème de la Crème.«

In einer Videokonferenz wirkt Woodward hingegen bescheiden: »Der Ansatz verdankt sich nicht Genialität oder tief gehender Einsicht.« Woodward und Fearn sitzen dabei in seinem Büro, das zu ihrem gemeinsamen geworden ist und beschreiben, wie MEGA funktionieren könnte.

Am Anfang steht die Trägheit. Das Wort bezeichnet die Tendenz der Dinge, ihre einmal eingeschlagene Bewegung beizubehalten beziehungsweise in Ruhe zu bleiben, falls sie stillstehen. Aber den Wissenschaftlern fehlt eine fundamentale Erklärung dafür, warum Massen dieses Beharrungsvermögen überhaupt zeigen. Ende der 1880er Jahre formulierte der österreichische Physiker Ernst Mach die Idee, Trägheit sei das Ergebnis der Gravitation der gesamten Materie im Universum. Jedes Teilchen in einem Raumschiffantrieb spürt also eine Anziehungskraft von nahe gelegenem Material ebenso wie den kollektiven Einfluss von Milliarden von Lichtjahren entfernten Objekten. Und jedes Mal, wenn ein Gegenstand relativ zu alldem beschleunigt wird, ändert sich seine Masse ein wenig. Andere Physiker zu jener Zeit hatten ähnliche Ideen. Erst Albert Einstein prägte dafür die Bezeichnung Machsches Prinzip, nachdem er sich mit Ernst Machs Ausführungen dazu beschäftigt hatte.

Auch modernere Gelehrte – darunter der 2018 verstorbene Donald Lynden-Bell, der 1969 erstmals die Existenz supermassereicher Schwarzer Löcher in den Zentren der Galaxien vorschlug – haben sich der Ursachen der Trägheit



SPENCER LOWELL (SPENCERLOWELL.COM)

Links: James F. Woodward (sitzend) und Heidi Fearn spüren in ihrem Labor einem spekulativen Fortbewegungsprinzip für Raumschiffe nach. Das Foto oben zeigt das Herzstück des Mach-Effekt-Gravitationsantriebs. Es handelt sich um piezoelektrische Elemente, die sich periodisch strecken und stauchen. Sie befinden sich mitsamt empfindlichen Messgeräten in einem evakuierten und mit Bleiblöcken beschwerten, schützenden Acrylglaszylinder.

angenommen. Die Idee faszinierte Lynden-Bell bereits als Student. 1953 wurde er auf Arbeiten des Physikers Dennis Sciama aufmerksam, der zu dieser Zeit Machs Idee weiterentwickelt hatte. Obwohl Lynden-Bell während seiner gesamten Karriere das Interesse am Thema aufrechterhielt, blieb es für ihn ein Nebenprojekt; seine Forschungsphilosophie war grundsätzlich anders gelagert. »Brot-und-Butter-Wissenschaften sollten die Hauptaufgabe sein, also einfache Erweiterungen des Bekannten zu formulieren, um damit neue Phänomene zu ergründen«, schrieb er 2010. Und weiter: »Wir sollten nicht unsere ganze Zeit damit zubringen, große Probleme anzupacken, die womöglich außerhalb unserer Kapazität liegen.« Woodward, der sich ebenfalls von Sciama inspirieren ließ, hat ein völlig anderes Arbeitsethos, das sich eher mit »ganz oder gar nicht« zusammenfassen ließe. Entsprechend hartnäckig versucht er, das Machsche Prinzip auf Triebwerke zu übertragen.

Schnell schwankende Massen, zur rechten Zeit gestoßen und gezogen

Theoretisch funktioniert das folgendermaßen: Die Verformung eines Objekts beschleunigt sein Inneres, so wie das Zerknüllen eines Blatts Papier dessen Bestandteile in Bewegung bringt. Wenn etwas beschleunigt wird, ändert sich seine Energie. Das wiederum beeinflusst gemäß Einsteins berühmter Formel $E=mc^2$ die Masse, was sich auf die Trägheit auswirkt.

Aber was bedeutet das in der Praxis? Woodward und Fearn gehen der Frage mit ihrem Experiment nach. Herz des Versuchsaufbaus ist ein Stapel so genannter piezoelektrischer Elemente. Diese Scheiben bestehen aus speziellen Keramiken, die sich zusammenziehen und ausdehnen, wenn man eine Spannung anlegt – wie Papier, das sich zer- und entknittert. Ein Teil der Beschleunigung verändert die innere Energie der Scheiben und damit, so lautet die Hypothese, ihre Masse. Sie werden also abwechselnd schwerer und wieder leichter. Wenn man zusätzlich an ihnen zieht, während sie leicht sind, und auf sie drückt, während sie schwer sind, erhält man netto eine Schubkraft, ohne dabei Treibstoff ins All blasen zu müssen.

Das klingt skizzenhaft, und tatsächlich sehen einige Wissenschaftler dabei das Prinzip der Impulserhaltung verletzt. Andere Untersuchungen hingegen halten es für möglich. Jedenfalls erregte die Idee die Aufmerksamkeit von Gary Hudson, dem Präsidenten des Space Studies Institute in Kalifornien, das einst der angesehene Theoretiker Freeman Dyson leitete. Die dort 2013 gegründete Exotic Propulsion Initiative stellte die ersten Mittel für Woodward und Fearn bereit.

Woodward fertigte Nachbauten seines Experiments an und schickte sie an Forscher in anderen Labors, damit sie versuchen konnten, die Messungen zu reproduzieren. Zusammen mit Lance Williams, damals Wissenschaftler bei der Aerospace Corporation, einem staatlich finanzierten Forschungs- und Entwicklungszentrum im kalifornischen El Segundo, schlug Fearn dem Space Studies Institute vor, einen Workshop für neuartige Antriebe zu veranstalten. Dieser fand im Herbst 2016 in Estes Park in Colorado statt. Am ersten Tag erklärte Hudson vor den versammelten Teilnehmern: »In der Vergangenheit stand unsere Arbeit auf den soliden Fundamenten der Technik und Physik, und mir ist bewusst, dass exotische Antriebstechniken heftig umstritten sind.« Aber, so fuhr er fort, dieses Gebiet fasziniere ihn schon lange. Der Sciencefiction-Autor Arthur C. Clarke äußerte ihm gegenüber einmal, wer sich weit von der Erde entfernen und zurückkehren wolle, brauche eines: einen Physiker, der ohne Umschweife eine Antwort auf die Frage hätte, was Trägheit ist. »Der Erste, der mir eine klare Antwort gab, war Jim Woodward«, erinnert sich Hudson.

Die im Verlauf der Konferenz diskutierten Ergebnisse der übrigen Teilnehmer schienen die Messungen von Woodward und Fearn zumindest zu einem gewissen Grad zu bestätigen. Sie zeigten Schub, wenn der MEGA-Aufbau in Betrieb genommen wurde und keinen im ausgeschalteten Zustand. Am dritten Tag trat Nembo Buldrini vom österreichischen Ingenieurbüro FOTEC vor. Er untersucht normalerweise elektrische Triebwerke, aber ein paar Jahre zuvor hatte Woodward ihm eines seiner Geräte geschickt. Buldrini verglich sein Diagramm mit dem von Woodward und Fearn. Beide zeigten einen Ausschlag beim Einschalten, danach einen recht gleichmäßigen Schub und einen Ausschlag beim Ausschalten. Die Größenordnungen des Schubs unterschieden sich allerdings. Buldrini vermutete ein Problem der Kalibrierung; Woodward hielt auch Abweichungen bei den Ausgleichsmassen für eine mögliche Ursache. Zwei weitere Gruppen hatten ähnliche Muster gefunden. Martin Tajmar von der Technischen Universität Dresden konnte nur auf vorläufige Ergebnisse verweisen, aber der Elektroingenieur George Hathaway hatte ebenfalls einen Schub gemessen. Er hatte dafür nach eigenem Bekunden schwingungsgedämpfte Tische gegen kleine Erschütterungen der Erde verwendet.

Angesichts dieser ersten Überprüfungen gewährte das NIAC Woodward und Fearn 2017 die Phase-I-Förderung. Das heißt freilich nicht, dass die Kraft definitiv real und

nicht irgendein systematischer Fehler ist – oder dass der Mach-Effekt sie verursacht.

2018 veröffentlichte Tajmar eine eingehendere Untersuchung im Rahmen seiner Initiative namens SpaceDrive, die darauf abzielt, exotische Antriebskonzepte zu überprüfen. Hier zeigte sich ein unrealistisch hoher Schub, was darauf deutet, dass es sich nicht um eine echte Kraft handelt, sondern um irgendeinen Fehler oder einen anderen Effekt, der lediglich so wirkt. 2018 präsentierte der Softwareentwickler Jamie Ciomperlik beim Workshop des Space Studies Institute eine Simulation, die Vibrationen im System als mögliche Ursache ausmachte. Im Mai 2019 stellte Tajmar eine weitere SpaceDrive-Studie online, in der unter Berücksichtigung derartiger Einflussfaktoren kein Schub übrig blieb. Woodward glaubt allerdings, dass der Aufbau nicht korrekt eingestellt wurde. Tajmar will mit seinem Team die Tests fortsetzen, zweifelt aber zugleich an der zu Grunde liegenden Theorie.

Ingenieur Marc Millis, der früher das Breakthrough Propulsion Physics Program der NASA leitete, hält es für durchaus möglich, dass die Teams fälschlicherweise Effekte feststellen. Er betont, wie wichtig Skepsis sei: »Der einzige Weg, Bedenken zu beseitigen, sind nun einmal Beweise.« Auf der Suche danach verbrachte Millis drei Monate in Tajmars Labor. »Ungeachtet der ersten Replikationen könnte sich alles immer noch als Messartefakt herausstellen. Oder es ist eben wirklich ein neues Phänomen.« Trotz der weiterhin unklaren Situation hielt die NASA die Ergebnisse der Phase I für so viel versprechend, dass sie 2018 eine Phase-II-Förderung gewährte.

Laser, Antimaterie und Fusionsbomben

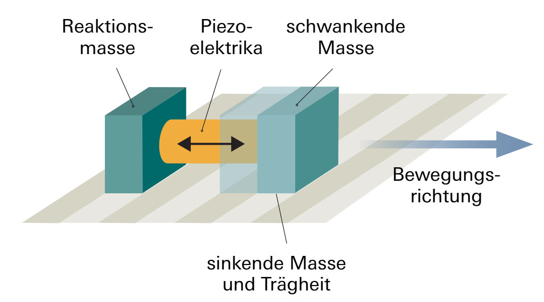
Woodward und Fearns Experiment ist das exotischste unter den NIAC-unterstützten Antriebskonzepten. Nicht alle Forscher, die über NIAC-Mittel verfügen, halten »exotisch« für den richtigen Weg. John Brophy vom Jet Propulsion Laboratory setzt auf Laser. Das klingt zunächst ähnlich wie bei Lubins Lichtsegel, aber Brophy will das Licht nicht von der Erde aus, sondern aus deren Umlaufbahn abstrahlen. Es zielt zudem auf Module, die es in elektrischen Strom umwandeln. Dieser fließt in ein Antriebssystem, das mit Lithium gefüllt ist. Die Spannung trennt Elektronen von den Hüllen der Atome und hinterlässt positiv geladene Ionen, die von einem elektrischen Feld beschleunigt werden. Das soll etwa 200 Kilometer pro Sekunde ermöglichen, die 20-fache Geschwindigkeit der Dawn-Sonde. Brophy hatte seinerzeit die Entwicklung von dessen Ionenantrieb geleitet.

Das Team ist sich aber nicht sicher, ob es die Strahlen exakt genug ausrichten kann, wie sich im Weltraum überhaupt eine solche Anordnung von Lasern umsetzen ließe und wie die Licht konvertierenden Module beschaffen sein müssten, um die notwendigen 6000 Volt zu erzeugen. »Doch genau dieser Grenzgang zum Unmöglichen macht es zu einer perfekten NIAC-Studie«, sagt Brophy.

Einige weitere Teams versuchen es ganz ohne elektrische Energie. Ein NIAC-Projekt zielt auf einen Motor mit Positronen ab. Dabei handelt es sich um Teilchen mit der gleichen Masse wie Elektronen, aber der entgegengesetzten Ladung. Normalerweise ist solche Antimaterie nach

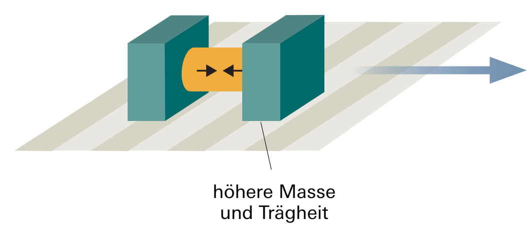
Der Mach-Effekt

Herkömmliche Raketen und Raumsonden müssen mitgeführten Treibstoff ausstoßen, um voranzukommen. Ließe sich Schub erzeugen, ohne auf solche begrenzten Ressourcen zurückzugreifen? Eine Idee ist der hypothetische Mach-Effekt: Beim Beschleunigen eines Objekts verändert sich dessen Masse leicht, was – geschickt ausgenutzt – unter dem Strich eine Kraft erzeugt.



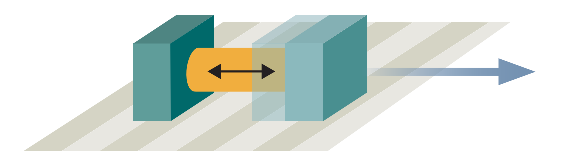
Schritt 1

Zwischen zwei Massen befindet sich ein Stapel piezoelektrischer Scheiben. Dabei handelt es sich um Keramiken, die sich unter Einfluss einer elektrischen Spannung ausdehnen und zusammenziehen. Die Masse auf der rechten Seite fluktuiert: Bei Ausdehnung des Stapels ist sie leichter und kann mit weniger Kraftaufwand bewegt werden.



Schritt 2

Während der Stapel wieder kontrahiert, ist die Masse auf der rechten Seite größer. Das erhöht ihre Trägheit und erschwert es, sie zurückzubewegen. Die konstante Masse auf der linken Seite wird stärker nach rechts gezogen, und der Gesamtschwerpunkt verschiebt sich.



Schritt 3

Indem sich diese Abfolge wiederholt, bewegt sich das Gesamtsystem nach rechts.

JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ihrer Erzeugung heiß und somit schwer zu kontrollieren und zu lagern. Wenn man sie allerdings abkühlt, lassen sich die Teilchen festhalten und – wie bei diesem Projekt angedacht – gezielt mit Elektronen zusammenbringen. Dabei entsteht energiereiche Strahlung. Diese soll wiederum eine Fusionsreaktion auslösen, welche letztlich die Raumsonde antreibt.

Eine andere Idee nutzt zwei Strahlen: einen aus Neutronen und einen aus einem Laser. Beide werden so miteinander verflochten, dass sie sich auf ihrem Weg durch den Weltraum gegenseitig bündeln: Der Neutronenstrahl hält die Photonen auf ihrer Bahn, indem er sie auf ihrem Weg beugt, und das Feld des Laserstrahls fängt seinerseits die Neutronen ein. Die Forscher sind der Auffassung, ein extrem energiereicher 50-Gigawatt-Laser könne eine Sonde mit einer Masse von einem Kilogramm innerhalb von 42 Jahren zum nächstgelegenen Sternensystem beschleunigen. Ähnlich wie bei Lubins Konzept wäre auch hier ein Lichtsegel nötig.

Bei einigen Ansätzen spielen sogar Atombomben eine Rolle. Robert Adams vom Marshall Space Flight Center der NASA leitet ein NIAC-gefördertes Projekt namens Pulsed Fission-Fusion (PuFF), das zwei nukleare Strategien kombiniert. Die Energie aus einer Kernspaltung soll die extremen Bedingungen für eine anschließende Kernfusion schaffen. Was zunächst nach dem Prinzip einer Wasserstoffbombe klingt, entfaltet in Form von Adams' System »Z-Pinch« deutlich weniger zerstörerisches Potenzial. In einem Plasma (in dem Fall besteht es aus einer heißen Wolke aus Lithiumkernen) induziert ein elektrischer Strom ein Magnetfeld. Dieses ist stark genug, um ein so genanntes Target aus Uran sowie Deuterium und Tritium (die an Neutronen reichen Varianten des Wasserstoffs) zusammenzudrücken. Das zerquetschte Uran wird kritisch, es kommt also zur Kettenreaktion, und seine Spaltung regt das Deuterium-Tritium-Gemisch zur Kernfusion an. Dabei werden Neutronen frei, die zur Spaltung beitragen, was wiederum die Fusionsrate erhöht. Die zweistufige Explosion hat die Energie von einigen Kilogramm TNT.

Ein riskantes Unterfangen mit viel Sprengkraft – und jähem Ende

Wenn sehr viele solcher Minibomben nacheinander Impuls auf ein Raumschiff übertragen, könnten sie dieses wesentlich schneller vorwärtsbringen als jeder chemische Antrieb. Nach fünfmaligem Antrag erhielt Adams 2018 schließlich eine Phase-II-Förderung. Das größte Problem bei der Umsetzung eines derartigen Fusionsmotors für Raumschiffe lässt sich mit dem Zusammendrücken eines cremegefüllten Kuchens veranschaulichen. Wenn man versucht, ihn gleichmäßig zu komprimieren und die schaumige Masse gezielt in eine Richtung zu drücken, quillt sie stattdessen zu allen Seiten heraus. Ein Teil der Energie geht verloren.

In der Vergangenheit gab es ähnliche Projekte: Von 1958 bis 1964 unterstützten das US-Militär und die NASA eine von Freeman Dyson angeführte Initiative mit 11 Millionen Dollar (das entspricht heute 93 Millionen Dollar). Das Ziel war ein nukleares Antriebssystem namens Orion mit dem Motto »Mars bis 1965, Saturn bis 1970«. Das Projekt war zu zivil für das Militär und zu explosiv für die NASA, so dass beide Organisationen sich nur zurückhaltend einbrachten. Schließlich wurde eine Weiterentwicklung unmöglich, als die USA 1963 ein Atomteststoppabkommen unterzeichneten. Dyson kommentierte damals, das sei »das erste Mal in der modernen Geschichte, dass eine bedeutende Erweiterung der menschlichen Technologie aus politischen Gründen unterdrückt wurde«. Das zeigt: Die Leistungsfähigkeit ist nicht der einzige Faktor, der bestimmt, welche Konzepte zur Realität werden. Alles, was wir in den Weltraum entsenden, startet auf der Erde – wo es Gesetze, Konflikte, schlecht verstandene Physik und sonstige Unwägbarkeiten gibt, die Projekte zu riskant erscheinen lassen. Das erzeugt im übertragenen Sinn eine andere Form von Trägheit – die Tendenz, mit den immer gleichen Technologien den einmal eingeschlagenen Weg immer weiter zu gehen.


NASA / STS-130 CREW MEMBER

Ein endgültiges Urteil über Woodwards und Fearns Antrieb steht bislang aus, und selbst im Erfolgsfall ist offen, wie nützlich er überhaupt sein kann. Die aktuellen Geräte liefern nur einen Schub im Bereich von Mikronewton. Das entspricht dem Gewicht einer Taufliege. Eine Taufliege bringt noch keine Raumsonde nach Alpha Centauri, aber jede Reise muss irgendwie beginnen. Mit den Phase-II-Mitteln hoffen die beiden Forscher auf deutlichere Effekte durch mehrere, parallel angeordnete Bauteile. Anschließend ist ihr Ziel – sofern sie die Gelder dafür auftreiben können – ein Minisatellit, bei dem sich anhand von Veränderungen in der Umlaufbahn unzweifelhaft überprüfen ließe, ob der Mach-Effekt unter realen Einsatzbedingungen auftritt.

2019 lobte das NIAC eine zusätzliche Finanzierungslinie aus: Phase-III-Auszeichnungen mit einer Höhe von insgesamt zwei Millionen US-Dollar. Die ersten Gelder daraus fließen an zwei Projekte, die Rohstoffquellen im nahen Weltraum erschließen sollen. In Zukunft könnten weitere dieser Finanzierungsrunden auch alternative Antriebskonzepte unterstützen. Zunächst jedoch, konstatiert Fearn, »will die NASA sicherstellen, dass es sich dabei nicht um etwas handelt, bei dem ein paar Leute ihre Zeit auf eine abwegige Sache verschwenden« – sondern dass die Idee tatsächlich auf eine gute Art verrückt ist. ◂

QUELLEN

Fearn, H., Woodward, J.: Experimental null test of a Mach effect thruster. Journal of Space Exploration 2, 2013

Sciama, D. W.: On the origin of inertia. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 113, 1953

KATEGORIENTHEORIE

MATHEMATIK AUS DER VOGELPERSPEKTIVE

In den letzten 70 Jahren entstand ein mathematischer Bereich, der es unter anderem ermöglicht, unerwartete Zusammenhänge aufzudecken. Inzwischen findet die abstrakte Disziplin auch handfeste Anwendungen in der Physik, Informatik oder Linguistik.



MARTIN KUPPE FÜR SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Mond der Kategorientheorie

MARTIN KUPPE FÜR SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Manon Bischoff ist theoretische Physikerin und Redakteurin bei **Spektrum**.

spektrum.de/artikel/1681198

Stellen Sie sich vor, Sie fliegen über eine Welt namens Mathematistan. Relativ mittig erblicken Sie das bekannte Reich der Arithmetik, in dem Zahlen miteinander addiert, multipliziert, voneinander abgezogen und dividiert werden. Daran grenzen die Hügel der Zahlentheorie, mit Primzahlen und anderen seltsamen Konstrukten, während sich südlich das riesige Kalifat der Al-Gebra befindet, in dem sich nicht nur wie in der Arithmetik Zahlen miteinander verknüpfen lassen, sondern auch kompliziertere Objekte wie Matrizen.

In solcher Höhe verschwimmen die Details der einzelnen Gebiete, man kann bloß grobe Strukturen erkennen. Dafür macht man Brücken und Grenzregionen zwischen den verschiedenen Reichen aus, die sie verbinden. Beispielsweise liegt zwischen der Tundra der Topologie und dem Kalifat der Al-Gebra der Wald der algebraischen Topologie. Darin sind die Konzepte aus beiden Welten vereint: Während die Bewohner der Tundra beispielsweise geometrische Objekte nach der Anzahl ihrer Löcher klassifizieren, berechnen algebraische Topologen diese Anzahl durch algebraische Konstrukte wie Funktionen oder Gruppen.

Viele Forscher würden sich wünschen, die verschiedenen Bereiche der Mathematik auf ähnliche Weise überblicken zu können. Vor mehreren hundert Jahren gab es noch Universalgelehrte, die sich in fast allen Wissenschaften auskannten, von Philosophie über Physik bis hin zu Medizin. Ihre Erkenntnisse im einen Fachgebiet halfen ihnen in anderen Bereichen weiter. An so etwas ist heute gar nicht mehr zu denken. Ein Zahlentheoretiker und ein Stochastiker werden einander höchstwahrscheinlich nur schwer verstehen – und das, obwohl beide Mathematiker sind.

Dabei sind die einzelnen mathematischen Disziplinen gar nicht so unterschiedlich, wie sie auf den ersten Blick scheinen. Tatsächlich finden Wissenschaftler immer wieder strukturelle Ähnlichkeiten zwischen ihnen. Wenn etwa ein Problem aus der Analysis, die sich meist mit glatten Funktionen beschäftigt, einer ungelösten Aufgabe aus der Zahlentheorie gleicht, lassen sich die Werkzeuge aus dem einen Gebiet auf das andere übertragen. Doch dazu muss man bereit sein, das eigene vertraute Reich zu verlassen und eine Vogelperspektive einzunehmen, um sich nicht in den Details der einen oder anderen Disziplin zu verlieren. Genau das versucht die Kategorientheorie zu erreichen.

In der fiktiven Welt »Mathematistan« sind die verschiedenen mathematischen Disziplinen angesiedelt. Die Kategorientheorie nimmt dabei eine besondere Stellung ein: Sie ermöglicht es, die unterschiedlichen Gebiete zu überblicken.

AUF EINEN BLICK
HÖHENFLUG FÜR MATHEMATIKER

1. Die Kategorientheorie ermöglicht es, über den verschiedenen mathematischen Disziplinen zu »schweben«, wodurch sich unerwartete Zusammenhänge offenbaren.

2. Allerdings führt der Perspektivwechsel auch dazu, dass sich keine Details mehr erkennen lassen. Explizite Ergebnisse liefert das Gebiet also nicht.

3. Dennoch widmen sich inzwischen vermehrt andere Wissenschaftler wie Physiker oder Linguisten der abstrakten Theorie, um handfeste Probleme ihrer Gebiete neu zu beleuchten.

»Mich hat dieser Aha-Moment schon immer angezogen, der aufkommt, wenn sich scheinbar ungleiche Ideen vereinheitlichen lassen«, erzählt die Mathematikerin Tai-Danae Bradley von der City University of New York. »Deshalb war ich sehr aufgeregt, als ich zum ersten Mal von einem Zweig der Mathematik erfuhr, der dabei hilft, klar über solche übergreifenden Konzepte nachzudenken.«

Ein derartiger Perspektivwechsel hat aber auch Nachteile. Kategorientheoretiker schweben in so hohen Sphären, dass sie kaum explizite Ergebnisse liefern: Sie werden niemals eine Differenzialgleichung lösen oder ein Integral berechnen. Andererseits können sie unbekannte Wege entdecken, die zur Lösung eines handfesten Problems führen. Um diese tatsächlich zu berechnen, muss man dann jedoch wieder auf den Boden der Tatsachen zurückkehren und die Arbeit im passenden Gebiet erledigen.

In ihren Anfängen fand die Kategorientheorie keinen großen Anklang. Mathematiker bezeichneten sie häufig – zum Teil auch humorvoll – als »abstrakten Unsinn«. Dass das Gebiet äußerst nützlich sein kann, ist inzwischen aber unbestritten. Viele mathematische Fortschritte der letzten 70 Jahre wären ohne die Kategorientheorie undenkbar. Doch selbst heute scheiden sich die Geister, ob es sich dabei wirklich um eine eigenständige Theorie handelt oder bloß um ein hilfreiches Begriffssystem, mit dem man komplizierte Sachverhalte einfacher darstellen kann.

Obwohl sie als extrem abstrakt gilt, taucht die Kategorientheorie in den letzten Jahren vermehrt in anderen Wissenschaften auf, um deren Probleme in einem neuen Licht darzustellen. So greifen beispielsweise Informatiker darauf zurück, um neue Programmiersprachen zu entwickeln, oder Linguisten decken damit grammatikalische Gemeinsamkeiten verschiedener Sprachen auf.

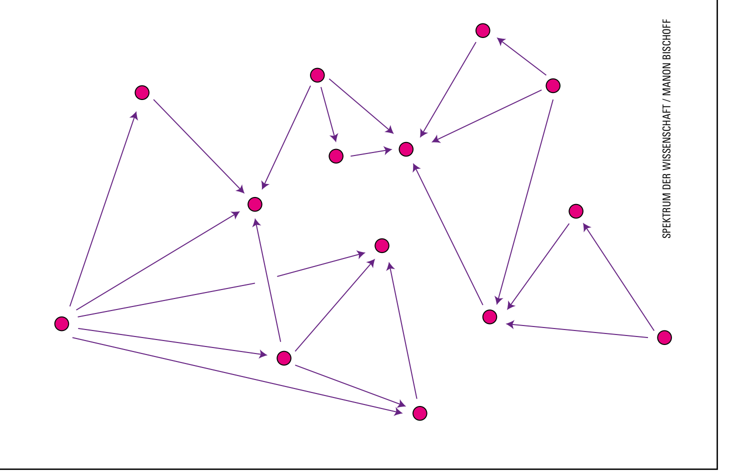
Rechnen nach Rezept

Kategorien fügen sich so gut in verschiedenste Disziplinen ein, weil sie ganz allgemein definiert sind: Eine Kategorie besteht aus einer Sammlung von Dingen, die sich durch so genannte Morphismen ineinander umwandeln lassen (siehe »Kategorien«, unten). Worum genau es sich bei den Dingen und Morphismen handelt, ist nicht entscheidend. Ein Beispiel für eine Kategorie sind natürliche Zahlen (n, m, …) als Objekte und Funktionen ($f\colon n \to m$) als Morphismen, die sie einander zuordnen. Oder die natürlichen Zahlen als einziges Objekt und alle Funktionen, die natürliche Zahlen auf sich selbst abbilden, als Morphismen. Andererseits können auch Oberflächen Objekte darstellen, während die Transformationen, die sie ineinander umformen, Morphismen entsprechen. Ganz allgemein kann man sich eine Kategorie als Sammlung von Pfeilen (Morphismen) vorstellen, die verschiedene Punkte (Objekte) miteinander verbindet. Was genau die Pfeile und die Punkte repräsentieren, spielt keine Rolle; entscheidend ist nur, wie sie zusammenhängen.

Diese Ansicht stellte vor 70 Jahren einen drastischen Paradigmenwechsel dar. Denn die Mengenlehre, auf der fast die gesamte Mathematik fußt, definiert die Objekte eines jeden Bereichs sehr klar. In der Kategorientheorie können dagegen natürliche Zahlen und geometrische Formen manchmal ununterscheidbar erscheinen, während die Kategorie der Zahlen, die durch stetige Funktionen verknüpft sind, völlig anders ist als die Kategorie der Zahlen mit differenzierbaren Funktionen.

Kategorien

Eine Kategorie besteht formal aus einer Sammlung von Objekten (A, B, C, …, rote Punkte) und Umwandlungen (f, g, h, …, lila Pfeile), so genannten Morphismen, wobei jeder Morphismus f genau zwei Objekte ($f\colon A \to B$) verbindet. Zusätzlich muss jedes Objekt einen neutralen Morphismus besitzen ($1_A\colon A \to A$), und je zwei Morphismen der Art $f\colon A \to B$ und $g\colon B \to C$ müssen sich miteinander verknüpfen lassen $g \circ f\colon A \to C$, so als würde man sie hintereinander ausführen. Diese Verknüpfung ist assoziativ, das heißt: $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$.


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Geometrie und Algebra

Schon drei Jahrhunderte vor der Kategorientheorie erkannte René Descartes, dass Geometrie und Algebra zusammenhängen. Während es bei Ersterer um Sammlungen von Punkten im Raum geht, beschäftigt sich die Algebra mit der Verknüpfung abstrakter Objekte. Möchte man beispielsweise die Schnittpunkte zweier Kurven ermitteln, kann man sie entweder zeichnen und das Ergebnis im Koordinatensystem ablesen oder die dazugehörigen algebraischen Gleichungen gleichsetzen und die Punkte berechnen.

Den formalen Beweis, dass beide Bereiche wirklich gleichwertig sind, erbrachte aber erst Alexander Grothendieck in den 1970er Jahren. Er untersuchte damals auf der algebraischen Seite die Kategorie der so genannten kommutativen Ringe. Dabei handelt es sich um eine Sammlung von Elementen, die man wie die ganzen Zahlen addieren und multiplizieren kann. Ein Beispiel dafür sind Polynome wie $a_n x^n + \ldots + a_1 x + a_0$. Die Kategorie dieser Ringe enthält Abbildungen *f*, die einen Ring *R* in einen anderen Ring *S* überführt ($f: R \rightarrow S$), also beispielsweise die Polynome in reelle Zahlen.

Auf der geometrischen Seite widmete sich Grothendieck der Kategorie der »affinen Schemata«, die alle topologischen Räume enthält, die sich aus den kommutativen Ringen ergeben. Für Polynome ist der dazugehörige Raum eine algebraische Kurve.

Indem Grothendieck die algebraische Geometrie von bloßen Kurven auf Schemata erweiterte, wälzte er das Gebiet vollständig um. Er konnte dadurch zeigen, dass es wirklich eine Eins-zu-eins-Übereinstimmung zwischen der Algebra und der Geometrie gibt: Für jeden kommutativen Ring gibt es genau ein affines Schema und umgekehrt. Aus kategorientheoretischer Sicht sind beide Kategorien daher äquivalent. Das ermöglicht es, Theoreme aus dem einen Bereich in den anderen zu »übersetzen«.

Ein Objekt ist in der Kategorientheorie vollständig durch seine Beziehung zu den anderen Objekten definiert – unabhängig davon, ob es sich um eine Zahl, eine Oberfläche oder etwas Abstrakteres handelt. Das mag ungewöhnlich klingen, doch der Gedanke ist nicht neu: In der Physik identifiziert man beispielsweise ein Teilchen in einem Beschleuniger, indem man es mit anderen Partikeln bombardiert und die Wechselwirkungen zwischen ihnen untersucht.

Die Kategorientheorie bietet Mathematikern einen allgemein gültigen theoretischen Rahmen, den sie mit Objekten und Abbildungen ihres jeweiligen Bereichs füllen können. Sie müssen dabei nicht zwischen einzelnen Fachgebieten unterscheiden, sondern konzentrieren sich nur auf die jeweiligen zu Grunde liegenden Strukturen.

Man kann sogar noch weiter gehen. Da es egal ist, mit welchen Objekten man eine Kategorie füllt, kann man sie ihrerseits mit Kategorien füllen, wodurch man eine »höhere Kategorie« erhält. Damit lassen sich Brücken zwischen mathematischen Disziplinen entdecken, denn die Brücken entsprechen gerade den Umwandlungen, so genannten Funktoren, die eine Kategorie in eine andere überführen (siehe Grafik S. 84 oben). Eines der bekanntesten Beispiele für einen Funktor fand der französische Gelehrte René Descartes bereits im 17. Jahrhundert, lange bevor es die Kategorientheorie überhaupt gab. Damals stellte er fest, dass sich viele geometrische Probleme durch algebraische Gleichungen lösen lassen. Er führte das nach ihm benannte kartesische Koordinatensystem ein, womit er den ersten Zusammenhang zwischen der Geometrie und der Algebra begründete (siehe »Geometrie und Algebra«, oben). Da man beide Gebiete als Kategorien auffassen kann, lässt sich ein Funktor finden, der beide ineinander umwandelt. Die Geometrie und die Algebra bilden damit eine höhere Kategorie.

Unerwartete Zusammenhänge

Die Geburtsstunde der abstrakten Theorie ließ jedoch noch 300 Jahre auf sich warten. 1941 hielt der US-amerikanische Mathematiker Saunders Mac Lane an der University of Michigan eine sechsteilige Vortragsreihe über seine jüngsten Forschungsergebnisse im Bereich der Zahlentheorie. Im Publikum saß unter anderem sein Kollege Samuel Eilenberg, der allerdings am letzten Vortrag nicht teilnehmen konnte. Als er wenig später Mac Lane aufsuchte, wiederholte dieser die Präsentation in einem privaten Rahmen. Eilenberg traute seinen Augen kaum: Sein Kollege konstruierte dabei ein mathematisches Objekt, das er schon einmal in einem völlig anderen Zusammenhang gesehen hatte, nämlich im Bereich der Topologie.

Das erschien äußerst seltsam, schließlich haben Topologie und Zahlentheorie nur wenig gemeinsam. Die Topologie ist wie eine Art Geometrie, die das Messen verlernt hat. Sie beschreibt zwar auch Formen und Körper, doch die Details entgehen ihr. Manchmal wird die Topologie als Knetgeometrie bezeichnet, denn sobald man zwei Dinge ineinander verformen kann, ohne Löcher in sie zu reißen, sind sie für Topologen identisch. Die Zahlentheorie beschäftigt sich dagegen mit Zahlensystemen. Erstaunlicherweise hängen beide Bereiche eng mit der Algebra zusammen.

Anders als bei der Geometrie dauerte es recht lange, bis Mathematiker bemerkten, dass sich topologische Konzepte in die Sprache der Algebra übertragen lassen. Anfang des

20. Jahrhunderts steckte die algebraische Topologie noch in den Kinderschuhen. Der Grund dafür ist die Ungenauigkeit, welche die Topologie ausmacht. Eine gewöhnliche Gleichung wie $x^2 + y^2 = 1$ entspricht beispielsweise dem Einheitskreis; eine Ellipse, die topologisch gesehen identisch ist, wird dagegen durch eine völlig andere Gleichung beschrieben.

Da Funktionen sie nicht weiterbrachten, wechselten Mathematiker zu anderen algebraischen Objekten: den ganzen Zahlen. Durch »topologische Invarianten« klassifizieren Forscher verschiedene Objekte, etwa Oberflächen, indem sie die Anzahl ihrer Löcher zählen. Während ein Brötchen und eine Brezel topologisch gesehen grundverschieden sind, erscheinen eine Tasse und ein Donut hier gleich.

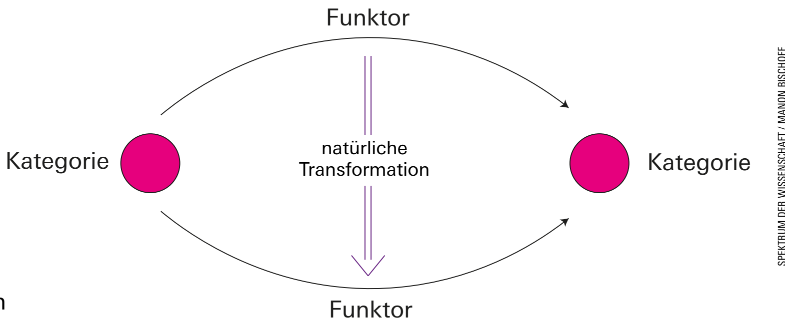
Diese simple Klassifizierung versteht selbst ein Kind. Auf formaler Ebene kann sie sich aber recht schwierig gestalten. Muss man jede geometrische Form erst visualisieren, um auf die Anzahl ihrer Löcher und damit ihre topologischen Invarianten zu schließen? In zwei Dimensionen mag das ja möglich sein, doch sobald man sich mehrdimensionalen Problemen stellt, führt es zu Schwierigkeiten.

Daher suchten Mathematiker nach einer Methode, Löcher mit algebraischen Mitteln aufzuspüren. Henri Poincaré erkannte 1895 als einer der Ersten, dass eine Möglichkeit darin besteht, alle möglichen geschlossenen Kurven auf einer geometrischen Form zu untersuchen. Wenn sich jede Kurve – ohne die Oberfläche zu durchdringen oder zu verlassen – wie ein Lasso zusammenziehen lässt, dann gibt es kein Loch. Das ist auf einer Kugel der Fall. Bei einem Torus, einer donutförmigen Oberfläche, gibt es dagegen gleich zwei verschiedene Arten von Kurven, die sich nicht zusammenziehen lassen (siehe Bild unten).

Allerdings sind die Objekte der Topologie, so genannte topologische Räume, nicht immer so anschaulich wie eine Kugel oder ein Torus. Sie können unzusammenhängende Formen in Schwindel erregend hohen Dimensionen sein oder aus Elementen seltsamer Zahlensysteme bestehen. In solchen Fällen lassen sie sich nicht so einfach klassifizieren.

Als sich die deutsche Mathematikerin Emmy Noether Anfang des 20. Jahrhunderts mit diesen Problemen beschäftigte, fiel ihr auf, dass topologische Räume nicht nur mit ganzen Zahlen, sondern auch mit Gruppen zusammenhängen. Die einfachsten Versionen dieser algebraischen Objekte bestehen aus Transformationen wie Drehungen oder Spiegelungen. Im Allgemeinen ähnelt die Definition einer Gruppe der einer Kategorie: Sie ist eine Sammlung von Dingen, die man ineinander umwandeln kann, und besitzt ein neutrales Element. Doch eine Gruppe muss eine weitere Anforderung erfüllen. Zu jedem Element gibt es ein »Inverses«, so dass beide miteinander verknüpft das neutrale Element ergeben.

Wie Noether herausfand, gibt es eine bestimmte Art von Gruppen, so genannte Homologiegruppen, aus denen sich charakteristische Zahlen berechnen lassen, die den Invarianten topologischer Räume entsprechen. Verformt man ein geometrisches Objekt, ohne dabei die dazugehörigen Invarianten zu verändern, gibt es ganz ähnliche Transformationen, die Homologiegruppen umwandeln, wobei auch ihre charakteristischen Zahlen gleich bleiben. Scheitert man also an der Aufgabe, die Invariante eines topologischen Raums zu berechnen, kann man sich stattdessen den dazugehörigen Homologiegruppen zuwenden.



Ein Funktor bildet eine Kategorie auf eine andere ab, während eine natürliche Abbildung die Funktoren verbindet. Durch »höhere Kategorien« verallgemeinern Mathematiker dieses Konzept.

Damit begründete die deutsche Mathematikerin eine neue Ära der algebraischen Topologie. Plötzlich standen nicht mehr nur die topologischen Räume im Rampenlicht, sondern ebenso die Beziehungen zwischen ihnen. Denn die Transformationen, die einen Raum verformen, ohne Löcher in ihn zu reißen, hängen mit den Abbildungen zwischen den dazugehörigen Homologiegruppen zusammen. Damit zeichnete sich damals schon das Hauptmerkmal der Kategorientheorie ab, dessen Fokus auf den Zusammenhängen zwischen Objekten liegt.

Verwickelte Donuts

Bevor Eilenberg an die University of Michigan gereist war, hatte er die Homologiegruppen komplizierter Räume erforscht. Mac Lane untersuchte hingegen Gruppen, die in der Zahlentheorie auftauchen. Verknüpft man Zahlen miteinander, lässt sich dabei häufig eine Gruppenstruktur erkennen. Beispielsweise bilden die ganzen Zahlen zusammen mit der Addition eine Gruppe. Gerade in den abstrakten Bereichen der Zahlentheorie erweist es sich häufig als nützlich, statt der Zahlen die dazugehörigen Gruppen zu studieren.

Mac Lane interessierte sich damals für extrem komplizierte Zahlensysteme. Um seine Berechnungen zu vereinfachen, verfrachtete er das Problem in den Bereich der Algebra. Dazu konstruierte er eine spezielle Art von Gruppe, eine »Gruppenerweiterung«. Einfach ausgedrückt besteht ein solches Objekt aus einer Gruppe G, die so um eine andere Gruppe H »vergrößert« wird, dass daraus wieder eine Gruppe entsteht.

Eilenberg erkannte die Gruppenerweiterung sofort wieder. Er hatte sie bereits in der Arbeit seines Kollegen Norman Steenrod gesehen, in der dieser einen komplizierten topologischen Raum untersucht hatte. Der



Raum ergibt sich, wenn man einen Torus nimmt und in dessen Inneres einen weiteren Torus p-mal hineinwickelt, in diesen wieder einen Torus p-mal hineinwickelt und das unendlich oft wiederholt. Die Schnittmenge all dieser Tori ergibt den topologischen Raum, dessen dazugehörige Homologiegruppe der Gruppe von Mac Lane entsprach.

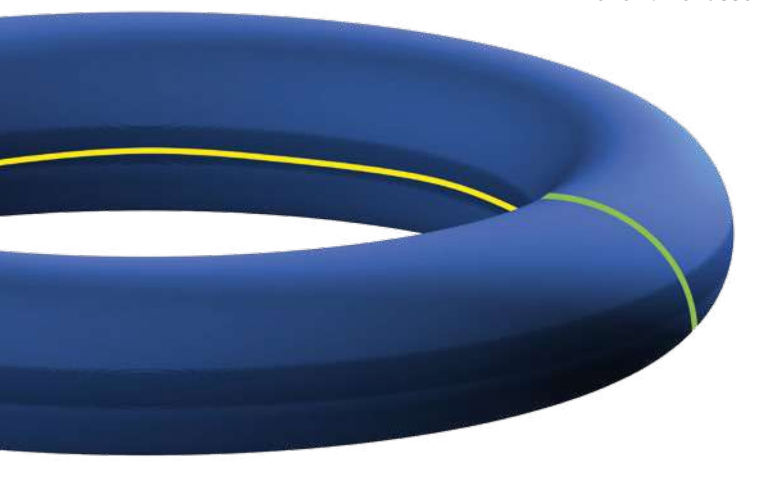
»Wir blieben die ganze Nacht auf, um herauszufinden, warum das so war«, erinnert sich Mac Lane. Das war der Beginn einer fruchtbaren Zusammenarbeit und einer lebenslangen Freundschaft zwischen den beiden Forschern.

Was sie so faszinierte, war, dass die Berechnungen von Mac Lane wesentlich einfacher ausfielen als jene im Zusammenhang mit topologischen Räumen. Häufig ist es nämlich extrem schwierig, Homologiegruppen zu bestimmen. Doch wie die Forscher nach einigen Monaten harter Arbeit herausfanden, bilden die Gruppenerweiterungen eine Art Brücke zwischen verschiedenen algebraischen Methoden, um die topologischen Eigenschaften eines Raums zu ermitteln. Das war ein echter Durchbruch. Wenn ein algebraischer Ansatz nicht funktionierte, konnten die Gruppenerweiterungen einen anderen Weg aufzeigen, um einen topologischen Raum zu untersuchen.

In den folgenden Jahren fanden die beiden Forscher weitere Übereinstimmungen zwischen Algebra und Topologie. »Da war mehr, als wir erwartet hatten«, sagte Mac Lane. »Wir waren gezwungen, Kategorien zu erfinden, um das zu beschreiben.« Sie definierten Kategorien damals nicht als die abstrakten Objekte, die man heute kennt, sondern betrachteten bloß den Spezialfall einer Kategorie, die aus Gruppen besteht.

Wissenschaftler schenkten den Kategorien damals kaum Beachtung. Erst Alexander Grothendieck erkannte, wie nützlich das Konzept sein kann. Der Mathematiker zählte zu den einflussreichsten Meistern seines Fachs – zumindest bis er sich 1991 in ein kleines französisches Bergdorf zurückzog und jeglichen Kontakt zur Außenwelt abbrach (siehe **Spektrum** Juli 2015, S. 52).

Bis kurz nach seiner Promotion hatte sich Grothendieck der Analysis gewidmet, bei der es hauptsächlich darum


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Anders als bei einer Kugeloberfläche gibt es auf einem Torus zwei Arten von geschlossenen Kurven (gelb und grün), die sich nicht zu einem Punkt zusammenziehen lassen, ohne die Oberfläche zu verlassen.

geht, geometrische Objekte mit differenzierbaren Funktionen zu vermessen. Sein Forschungsinteresse wandelte sich allerdings, als er Mitte der 1950er Jahre in die USA auswanderte. Damals hatte er keine Anstellung in Frankreich gefunden, denn er hatte sich geweigert, die französische Staatsbürgerschaft anzunehmen, um dem Militärdienst zu entgehen – und war daher mehrere Jahre staatenlos.

Einzelgänger revolutioniert die Mathematik

Während eines Forschungsaufenthalts in Kansas begann er, sich mit algebraischer Topologie auseinanderzusetzen. Damals war das Gebiet noch ziemlich chaotisch. Tatsächlich sucht man bis heute nach einem allgemeinen Rezept, das für jede Art von topologischem Raum die dazugehörige Homologiegruppe ausspuckt. Stattdessen gibt es mehrere Methoden, so genannte Homologien (siehe »Homologien«, S. 86), die sich je nach Art des Raums voneinander unterscheiden. Grothendieck gelang es, ein gemeinsames Fundament für viele dieser Konzepte zu schaffen. Zudem fand er dadurch weitere Homologien, mit denen sich die Homologiegruppen eines topologischen Raums berechnen lassen.

Damals interessierte sich Grothendieck vor allem für so genannte Garben, die auftauchen, wenn man algebraische Strukturen auf komplizierten topologischen Räumen untersucht. Formal sind topologische Räume als Vereinigung von Mengen definiert – man »klebt« einzelne Bereiche zusammen. Wenn man ein algebraisches Objekt wie eine Funktion auf einem solchen Raum betrachtet, muss man verstehen, wie es sich an den Klebestellen verhält. Dabei hilft die Theorie der Garben.

Sie spielt auch in der Physik eine wichtige Rolle, etwa in der allgemeinen Relativitätstheorie, die beschreibt, wie Masse die Raumzeit krümmt. Um die Bewegung von Teilchen im Kosmos nachzuvollziehen, muss man daher die physikalischen Gleichungen in einem gekrümmten Raum lösen. Physiker behelfen sich dabei mit einem Trick: Sie betrachten nur einen winzigen Ausschnitt des Raums, der dadurch flach erscheint – genauso wie die Erde in unserer Umgebung eben wirkt. Das ermöglicht es ihnen, die physikalischen Gleichungen an jedem Punkt der Raumzeit für den flachen Fall zu berechnen und diese Lösungen dann »zusammenzukleben«.

Die Garbentheorie wirkt meist nur lokal: Man arbeitet sich von Punkt zu Punkt in einem Raum fort, ohne die globale Struktur zu beachten. Beispielsweise macht es keinen Unterschied, ob man die Funktionen auf einer zylinderförmigen Fläche zusammenklebt oder auf einem Möbiusband. Bei der Topologie sind aber die globalen Eigenschaften eines Raums ausschlaggebend – Möbiusband und Zylinder sind zwei grundverschiedene Räume. Daher suchten viele Mathematiker Mitte der 1950er Jahre nach einer homologischen Theorie der Garben, die erklären würde, wie die globalen Merkmale eines Raums mit den darauf definierten algebraischen Objekten zusammenhängen.

Auch Eilenberg wusste, dass es eine homologische Theorie der Garben geben musste. Doch weder ihm noch seinen Kollegen gelang es, eine solche zu konstruieren. Erst Grothendieck fand eine Lösung, indem er einen Umweg machte und sich zunächst Kategorien zuwandte. Im Gegen-

Homologien

Topologie

Abbildungen

Verbindung zwischen Abbildungen

Homologie

Homologie

Abbildungen

Algebra

Gruppe G

Gruppe H

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Bisher kennt man noch keine allgemein gültige Methode, mit der sich die Homologiegruppen beliebiger topologischer Räume berechnen lassen. Doch für einige Spezialfälle gibt es Möglichkeiten, diese Gruppen zu bestimmen. Ein Beispiel dafür ist die so genannte Triangulierung. Wenn man es mit einem einfachen topologischen Raum wie einer Kugeloberfläche oder einem Torus zu tun hat, kann man ein Netz aus einzelnen Dreiecken über die Oberfläche spannen. Aus der einst glatten Form wird dadurch ein Polyeder mit Ecken, Kanten und Flächen.

Wie Leonhard Euler bereits 1750 erkannte, lässt sich die Anzahl der Löcher eines solchen Polyeders auf einfache Weise bestimmen. Denn die Anzahl der Ecken E minus die Anzahl der Kanten K plus der Anzahl der Flächen F einer Triangulierung ergibt eine topologische Invariante ($E - K + F = \chi$). Dieser »Euler-Charakter« χ ist bei einer Kugel immer zwei, ganz egal welche genaue Triangulierung man wählt, während er bei einem Torus stets null ist. Die Anzahl der Löcher eines Objekts erhält man, wenn man zweimal den Euler-Charakter von der Zahl Zwei abzieht. Aus den Ecken, Kanten und Flächen lassen sich zudem Gruppen definieren, mit denen man die Homologiegruppen des ursprünglichen topologischen Raums konstruieren kann.

Inzwischen nutzt man Computer, um Triangulierungen und die dazugehörigen Homologiegruppen zu berechnen. Doch leider lässt sich nicht jeder topologischer Raum triangulieren. Tatsächlich ist diese Methode nur zuverlässig auf Räume der Dimension kleiner gleich drei anwendbar. Höherdimensionale Strukturen nehmen teilweise so komplizierte Formen an, dass eine Triangulierung nicht möglich ist. In solchen Fällen müssen andere Konzepte herhalten, um Homologiegruppen zu finden.

satz zu seinen Kollegen Mac Lane und Eilenberg, die Kategorien nutzten, um ein bestimmtes Problem anzugehen, strebte Grothendieck nach Höherem. Er suchte nach einem übergreifenden Rahmen, der Homologien erweitert. Dabei behandelte er Kategorien erstmals nicht nur als Werkzeug, sondern als eigenständige Theorie, die verschiedene Bereiche miteinander verschmilzt. Dadurch konnte er Verbindungen zwischen Verbindungen erkennen: Plötzlich verstand er, wie einige Homologien zusammenhängen – er hatte Abbildungen gefunden, die Homologien auf andere Homologien abbilden. Dadurch war er in der Lage, völlig neue Homologien zu entwickeln, darunter eine für Garben.

Nach diesen bahnbrechenden Entdeckungen wandte sich der vielseitige Forscher einem neuen Bereich zu, der algebraischen Geometrie. Dabei geht es um geometrische Formen, die sich aus polynomialen Gleichungen (etwa $3x^4y^2 + 6y^2 + 5 = 0$) ergeben. Auch in diesem Fall half ihm die Kategorientheorie, das Gebiet nachhaltig zu verändern.

Grothendieck beförderte die algebraische Geometrie auf eine abstraktere Stufe, indem er nicht bloß Polynome als Forschungsgegenstände zuließ, sondern ganz allgemein »Ringe«. Ringe ähneln Gruppen, nur dass sie zwei Verknüpfungen zwischen ihren Elementen enthalten. Ein Beispiel dafür sind Polynome, die man addieren und miteinander multiplizieren kann. Durch die Erweiterung auf Ringe offenbarte der Mathematiker unerwartete Zusammenhänge zwischen der algebraischen Geometrie und anderen mathematischen Disziplinen, etwa der Zahlentheorie. Man kann sich kaum vorstellen, wie diese Bereiche ohne sein Zutun heute aussehen würden.

Ein neues Fundament für die gesamte Mathematik

Nach diesen und vielen anderen beeindruckenden Ergebnissen wurde die Kategorientheorie immer beliebter. Der US-amerikanische Forscher William Lawvere ging in seiner Doktorarbeit 1963 sogar noch einen Schritt weiter: Er äußerte die Idee, die gesamte Mathematik auf der Kategorientheorie zu begründen und damit die Mengenlehre als Grundlage abzulösen. Ihm und vielen seiner Kollegen gefiel der Gedanke eines übergreifenden Rahmens, bei dem nicht die genaue Art der Objekte entscheidend ist, sondern ihre Verbindungen zueinander. »Viele Mathematiker haben eine kategorische Denkweise, selbst wenn sie nicht alle Konzepte oder Theoreme nutzen«, meint Tai-Danae Bradley.

Anstatt also die Mathematik aus den Axiomen der Zermelo-Fraenkel-Mengenlehre aufzubauen, schlug Lawvere vor, Mengen durch Kategorien zu definieren und daraus alles herzuleiten. Allerdings interessierten sich nur wenige Mathematiker für diesen Ansatz. »Wissenschaftler widmen ihre Zeit interessanteren Dingen«, erklärt Steve Awodey von der Carnegie Mellon University in Pittsburgh. Aus einigen Konzepten der Kategorientheorie ging aber die Homotopietypentheorie (HoTT) hervor, die der kürzlich verstorbene russische Mathematiker Vladimir Voevodsky (siehe **Spektrum** Dezember 2016, S. 60) zusammen mit Awodey und anderen

mitbegründet hat. »Dafür muss man zwar auch die Grundlage der Mathematik zumindest umschreiben, allerdings nicht aus philosophischen Gründen, sondern aus praktischen«, sagt Awodey. Ziel dieser Theorie ist es, mathematische Formalismen wie Beweise Computern zugänglich zu machen, um sie einfacher und schneller zu überprüfen.

Inzwischen zweifelt keiner mehr daran, wie nützlich die Kategorientheorie ist. Ohne sie gäbe es keine algebraische Geometrie oder algebraische Topologie – jedenfalls nicht in der Form, wie wir sie kennen. Dennoch sehen einige Forscher den Bereich nicht als eigenständige Theorie an. »Es ist nicht so, dass die Kategorientheorie frei im Raum schwebt, sondern sie ist immer an andere Disziplinen gebunden. Deswegen ist sie für mich eher ein Begriffssystem«, sagt Christoph Schweigert von der Universität Hamburg. Denn die besondere Kraft der Kategorientheorie besteht darin, nützliche Verbindungen aufzudecken, die man dann mit den Werkzeugen anderer mathematischer Disziplinen wie der Algebra oder Topologie auf konkrete Situationen anwenden kann.

Andere Forscher teilen diese Ansicht allerdings nicht. »Es gibt auch eigenständige Zweige der Kategorientheorie. Es gibt viele Mathematiker, die Kategorientheoretiker sind, es gibt Tagungen zu diesem Thema, Zeitschriften, unzählige Veröffentlichungen und so weiter«, entgegnet Awodey.

Offenbar führt die Kategorientheorie noch immer zu Unstimmigkeiten. Gerade wenn es darum geht, was genau Äquivalenz bedeutet, liefert die abstrakte Theorie zum Beispiel ganz andere Antworten als die Mengenlehre. Aus mengentheoretischer Sicht ist es einfach zu beurteilen, ob zwei Dinge identisch sind, da Objekte in ihr klar definiert sind. In der Kategorientheorie ist das anders. So etwas wie »die« natürlichen Zahlen gibt es nicht, sondern bloß das Konzept der natürlichen Zahlen. Daher sind aus kategorientheoretischer Sicht zwei Dinge gleich, wenn sie isomorph sind, das heißt, wenn es eine Abbildung und entsprechende eine Umkehrabbildung gibt, die beide Objekte verbindet. Dieser Aspekt führte im Jahr 2018 zu einem Streit zwischen drei berühmten Mathematikern (siehe **Spektrum** Januar 2019, S. 30).

Dabei ging es um die berühmte ABC-Vermutung, die der Japaner Mochizuki nach eigenen Angaben gelöst haben soll. Sein Beweis umfasst 500 Seiten, die sich wiederum auf weitere 500 Seiten Hintergrundmaterial beziehen. Forscher aus aller Welt hatten große Schwierigkeiten, dem ungewöhnlichen Stil des Japaners zu folgen. Nun glauben die Mathematiker Jakob Stix und der Fields-Medaillen-Preisträger Peter Scholze einen Fehler in seiner Argumentation gefunden zu haben. Der scheinbare Widerspruch ergibt sich, wenn man an einer Stelle des Beweises isomorphe Objekte als identisch behandelt. Mochizuki hält daran fest, dass man die betreffenden Objekte unterscheiden muss, während die deutschen Mathematiker anderer Meinung sind. Wer von ihnen richtigliegt, wird sich hoffentlich bald zeigen.

Unterdessen betreiben einige Wissenschaftler große Anstrengungen, um die Kategorientheorie auch auf Probleme anderer Fachbereiche anzusetzen. Sie könnte Forschern dabei helfen, komplexe Systeme wie Schaltkreise oder chemische Reaktionen besser zu verstehen. John Carlos Baez von der University of California in Riverside organisierte in den letzten drei Jahren mehrere Konferenzen zu angewandter Kategorientheorie, um zu zeigen, dass die abstrakte Theorie auch in der Physik, Informatik, Linguistik, Biologie und vielen anderen Bereichen nützlich sein kann.

Eine Welt voller Kategorien

Zum Beispiel bedienen sich Festkörperphysiker der Kategorientheorie, um vor Kurzem entdeckte exotische Zustände – so genannte topologische Phasen – von Materie zu beschreiben. Informatiker nutzen die abstrakten Konzepte hingegen, um neue Programmiersprachen zu entwickeln, die weniger fehleranfällig sein sollen. Das berühmteste Beispiel dafür ist »Haskell«. Und selbst Biologen können mit Hilfe der Prinzipien der Kategorientheorie beschreiben, wie Enzyme in metabolischen Systemen ausgewechselt und repariert werden. Zudem schafft die mathematische Disziplin Ordnung in komplizierten chemischen Reaktionen zwischen verschiedenen Molekülen. Auch die Sozialwissenschaften profitieren von der Kategorientheorie: Linguisten decken beispielsweise mit mathematischen Mitteln grammatikalische Gemeinsamkeiten unterschiedlichster Sprachen auf.

Zudem kann die Kategorientheorie Forscher verschiedener Disziplinen zusammenführen. In der Vergangenheit hat sie Algebraiker und Topologen nähergebracht, nun könnte sie das auch über die Fachbereiche hinaus tun, wie es der Mathematiker Schweigert auf einer Konferenz erlebte: »Es ist erstaunlich, plötzlich konnte ich mich mit einem Computerwissenschaftler am Frühstückstisch darüber unterhalten, woran er gerade forscht – und wir benutzten eine gemeinsame Sprache!«

Doch dafür müssen Wissenschaftler erst einmal bereit sein, einen ihnen gegebenenfalls unbekannten und abstrakten Formalismus zu lernen. Das kann sich aber lohnen, wie der Informatiker Thorsten Altenkirch von der University of Nottingham feststellte. »Als ich erstmals von höherer Kategorientheorie gehört habe, habe ich die Nase gerümpft und gedacht ›Was ist das denn für eine Spinnerei‹«, erinnert er sich. »Wie sich herausstellt, ist es genau die, die man braucht.« In einigen Bereichen der Informatik ist die abstrakte Theorie mittlerweile unerlässlich. »Kategorientheorie kann man entweder lernen oder neu erfinden«, erklärt Altenkirch. Auftauchen wird sie aber so oder so. ◂

QUELLEN

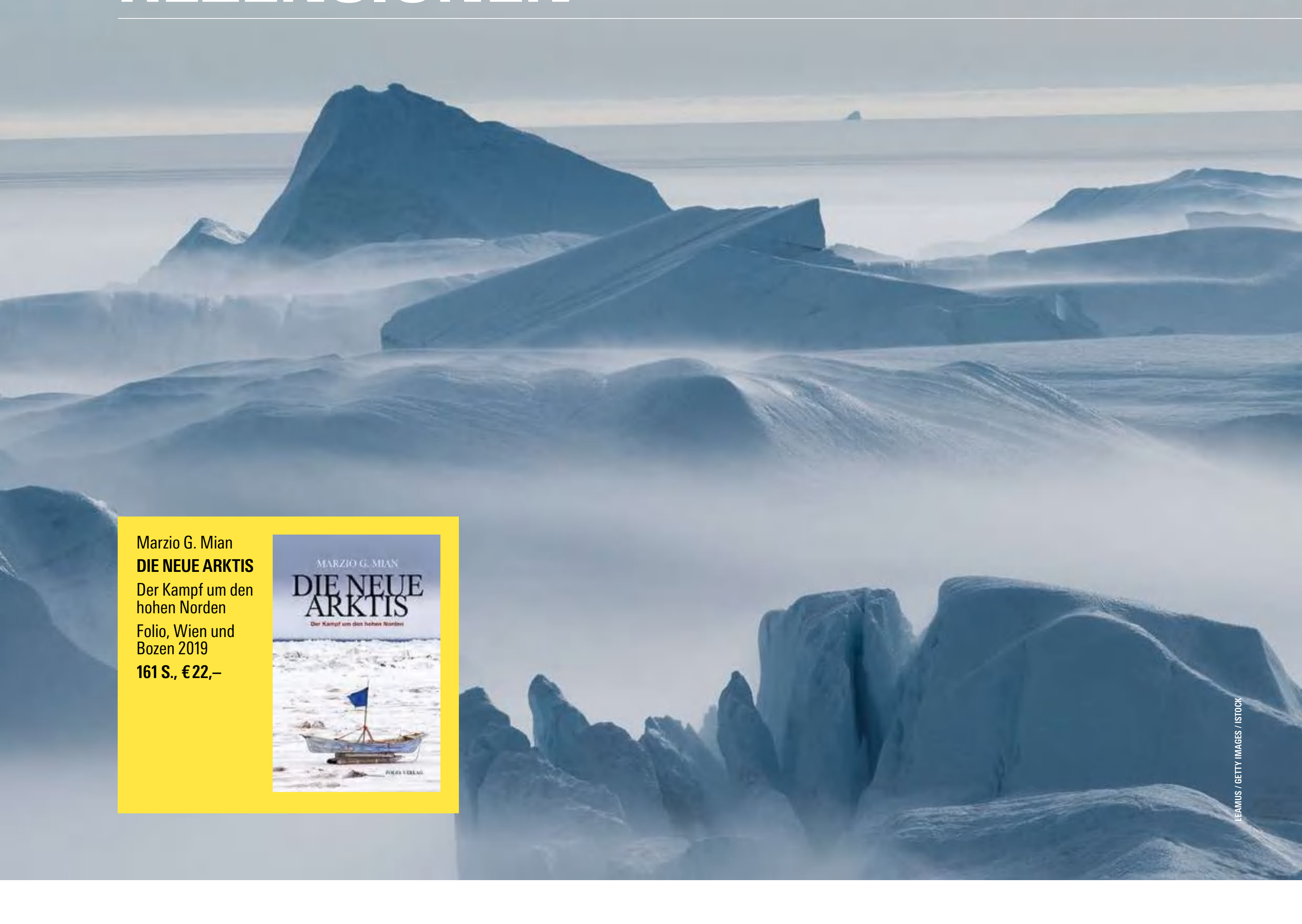
Baez, J.C., Stay, M.: Physics, topology, logic and computation: a rosetta stone. In: Coecke, B. (Hg.): New structures for physics. Springer, 2011

Bradley, T.-D.: What is applied category theory? ArXiv 1809.05923, 2018

Marquis, J.-P.: From a geometrical point of view. Springer, 2009

Mazur, B.: When is one thing equal to some other thing? In: Gold, B., Simons, R.A. (Hg.): Proof and other dilemmas: mathematics and philosophy. Mathematical Association of America, 2008

Spivak, D.I.: Category theory for the sciences. MIT Press, 2014



Marzio G. Mian
DIE NEUE ARKTIS
Der Kampf um den hohen Norden
Folio, Wien und Bozen 2019
161 S., € 22,–

LEAMUS / GETTY IMAGES / ISTOCK

KLIMAWANDEL
REAL GEWORDENE DYSTOPIE

In Reisereportagen beschreibt ein Journalist die klimatisch bedingten Veränderungen der nördlichen Polregion – und die darauf folgende Ausbeutung des Gebiets.

Wer dieses Buch aufschlägt, das den Wandel in der Arktis behandelt, erwartet zunächst vielleicht nicht viel Neues. Man braucht ja nur den Fernseher einzuschalten, um fast täglich von schmelzenden Gletschern und Ökosystemen im Umbruch zu erfahren – und den ikonischen Eisbären auf der schrumpfenden Eisscholle zu sehen. Wenn der Klappentext zudem noch die Dringlichkeit des Themas unterstreicht, indem er aus der Zeitschrift »Rolling Stone« zitiert – nicht gerade ein Fachblatt für Klimatologie –, mag das viele skeptisch stimmen.

Wie die Lektüre aber schon bald zeigt, hat es das Werk in sich. In fünf Reportagen führt der Journalist Marzio G. Mian seine Leser an verschiedene Schauplätze im hohen Norden, wo Veränderungen stattfinden, die an Dramatik kaum zu überbieten sind. Die Kapitel seines Buchs hat er in groben Zügen nach geografischen Regionen eingeteilt.

In den Texten berichtet er mehrfach aus Grönland, der amerikanischen beziehungsweise russischen Einflusssphäre in der Arktis sowie aus Island und Spitzbergen. Die Kapitel sind dabei sowohl hinsichtlich der geografischen Regionen als auch bezüglich der Themen nicht immer klar abgegrenzt, was dem Werk jedoch in keiner Weise schadet – denn die ökologischen und gesellschaftlichen Umbrüche, die Verteilungskämpfe um Bodenschätze, Lebensraum, Meeresressourcen, Schifffahrtsrouten und strategischen Einfluss machen vor Breiten- und Längengraden nicht Halt.

Inhaltlich ist das Werk nicht zwingend überraschend; manches davon mag beispielsweise aus TV-Dokumentationen bekannt sein. Die kompakte Zusammenstellung hinterlässt dennoch einen bleibenden Eindruck und tiefe Betroffenheit. Mian beschreibt, wie chinesische Investoren bereits heute Gebiete auf Grönland abstecken, um dort seltene Erden abzubauen; wie Kreuzfahrtschiffe Spitzbergen regelrecht umzingeln; und wie Teile der russischen Tundra irreparable, bergbaubedingte Umweltschäden erleiden. Er legt dar, dass auf der mittlerweile



LEAMUS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die Arktis ist besonders stark vom Klimawandel betroffen. Die mittleren Lufttemperaturen dort steigen etwa doppelt so schnell wie die globale Durchschnittstemperatur.

eisfrei befahrbaren Nordwestpassage, der »blauen Seidenstraße«, ungeregelte Bedingungen herrschen wie zur Zeit des Goldrauschs in Alaska und der erste Unfall nur eine Frage der Zeit ist. Zudem erfahren die Leser, dass in isländischen Fjorden Transithäfen für riesige Containerschiffe geplant werden. Dies alles schildert Mian sehr eindringlich, packend und stilistisch gelungen; mitunter erinnern seine Texte an die Reisereportagen Roger Willemsens.

Die Texte behandeln primär, wie sich der Wandel in der Arktis gesellschaftlich auswirkt, sei es in politischer oder persönlicher Hinsicht. Das ist sehr überzeugend, da Mian nah an den handelnden Personen berichtet. Geht es etwa um die Förderung von Bodenschätzen auf Grönland, spricht der Autor sowohl mit Bewohnern, die durch Minenbetrieb direkt bedroht sind, als auch mit dem Betriebsleiter einer Mine sowie dem Industrieminister. Dabei werden die Ziele der Regierung, die mittels Ressourcenausbeutung möglichst große Eigenständigkeit erreichen will, ebenso deutlich wie die Einstellung einflussreicher Personen, etwa des Leiters der Vergabebehörde für Ölbohrrechte: »Drill, baby, drill!« Und es zeichnen sich deren Motive ab: Nordöstlich vor Grönland lagern große Mengen Öl – hunderttausende Barrel auf jeden Inuk.

Die Öl- und Gasressourcen des hohen Nordens locken nicht erst seit gestern, sondern bereits seit Jahrzehnten, wie aus dem Buch hervorgeht. So ist der italienische Mineralölkonzern ENI schon lange ein bevorzugter Partner des norwegischen Konzerns Equinor (früher Statoil). Gemeinsam beuten sie heikle Förderorte in der Barentssee aus, etwa auf der Ölbohrplattform »Goliath«. Was das für Risiken birgt, versucht der Autor so zu verdeutlichen: »Wenn dort oben etwas schiefgehen sollte, wird uns die Deepwater-Horizon-Katastrophe von 2010 im Golf von Mexiko im Vergleich wie ein lästiger Zwischenfall vorkommen.«

So groß die Gefahren für die Umwelt auch sein mögen: Die Staaten bringen sich in Stellung, um ihre Ansprüche geltend zu machen. Im Jahr 2007 erreichte ein russisches U-Boot den Nordpol und rammte eine russische Flagge aus Titan in den Meeresboden. Norwegen beharrt im Gegenzug darauf, das strategisch günstig gelegene Spitzbergen gehöre zu seiner Kontinentalplatte. Die Entwicklung ist beängstigend – Russland beispielsweise hat in nur vier Jahren

ein beachtliches »Arktis-Kommando« auf die Beine gestellt mit 4 Sturmbrigaden, 14 Luftwaffenstützpunkten, 16 Hochseehäfen, 40 Eisbrechern. Man beneidet den von Mian interviewten Bürgermeister des norwegischen Orts Kirkenes nicht, der in wenigen Kilometern Entfernung buchstäblich strahlende Nachbarn hat: den auch atomar hochgerüsteten Stützpunkt der Nordmeerflotte, die Stadt Murmansk.

Eine Bedrohung ganz anderer Art ist der zunehmende Tourismus, mit dem sich das empfindliche Ökosystem Arktis konfrontiert sieht. Beim Lesen dieser Passagen fühlt man sich ständig hin- und hergerissen zwischen dem Gefühl, gern einmal in diese faszinierenden Landschaften reisen zu wollen, und dem Bewusstsein, dass man damit den Untergang der dortigen Ökosysteme noch beschleunigen würde. Interviewpartner des Autors nennen dies »Last Chance Tourism« und machen klar: »Die Leute bezahlen dafür, einmal Amundsen zu spielen, die Reisegruppe wird zum Expeditionsteam, man sucht die Einsamkeit, aber in der Gruppe. Man erlebt die Wildnis oder begeistert sich für das Eis, als stünde man vor einem Gorillakäfig im Zoo. […] Ironischerweise wurde ausgerechnet das symbolkräftigste Opfer der menschlichen Umweltverschmutzung [die Arktis] zu einer Marke, die für Reinheit, Frische und unberührte Natur steht.«

Die ganze Absurdität des Arktis-Tourismus tritt in dem Marketingtext eines kalifornischen Anbieters von Kreuzfahrten zu Tage: »Genießen Sie den Komfort eines angenehm temperierten Schwimmbads auf einem unserer vierzehn Decks, und entdecken Sie, mit einem Glas Chardonnay in der Hand, das abgelegenste Ökosystem unserer Erde.« Wenn man schon auf die Ausbeutung der Ressourcen oder die Geopolitik wenig Einfluss hat, sollte man wenigstens das unterlassen, wie aus diesem gelungen übersetzten Werk hervorgeht.

Der Rezensent Tim Haarmann ist Geograf und arbeitet in Bonn.

Adrian Lobe
SPEICHERN UND STRAFEN
Die Gesellschaft im Datengefängnis
C.H.Beck, München 2019
256 S., € 16,95



DIGITALISIERUNG
IM DATENGEFÄNGNIS?

Wie sehr Algorithmen unser Leben steuern, haben wir schon lange nicht mehr im Blick – geschweige denn unter Kontrolle.

Kennen Sie das? Sie haben sich in einem Onlineshop ein Produkt angesehen, und seitdem erscheinen auf Ihrem Bildschirm ständig Werbeanzeigen verwandter Artikel. Sie öffnen einen Stadtplan auf Google Maps – und schon ist darin vermerkt, wo Ihre Freunde wohnen. Immer mehr verlieren wir den Überblick, welche Informationen Facebook, Google & Co. über uns speichern und was die Konzerne mit diesen Daten tun. Immer stärker wird das ungute Gefühl, nicht mehr zu wissen und schon gar nicht beeinflussen zu können, wo überall wir unter digitaler Beobachtung stehen.

In diesem Buch zeigt der Journalist und **Spektrum**.de-Kolumnist Adrian Lobe, dass die Digitalisierung enorme Folgen für die Gesellschaft hat. Hierfür beleuchtet er, auf welchen Feldern derzeit Technologien zur Datensammlung eingesetzt werden, und hinterfragt, auf welche Weise das unser Verhalten beeinflusst und Machtverhältnisse verschiebt.

Wie aus dem Werk hervorgeht, halten wir uns beispielsweise genauer an Vorschriften, wenn wir uns beobachtet fühlen. Oft lässt uns die Technik auch gar keine andere Wahl mehr, denn Algorithmen wirken häufig deutlich effektiver als Verbote. Wer braucht Gesetze zum Alkoholkonsum am Steuer, wenn elektronische Sperren das Autofahren unter Alkoholeinfluss viel wirksamer verhindern? Sie geben das Fahrzeug erst frei, wenn ein eingebauter Atemtest belegt hat, dass der Fahrer nüchtern ist.

Sollte doch jemand gegen geltendes Recht verstoßen, können GPS-, Herzfrequenz- und andere Daten von Verdächtigen deren Alibi entkräften oder untermauern. In jenen Fällen profitiert die Gesellschaft davon, dass smarte Geräte unser Leben immer lückenloser dokumentieren und ihre Daten immer leichter verfügbar sind. Trotzdem bewertet Lobe den zunehmenden Einsatz digitaler Technologien durchweg negativ. Durch sein Buch zieht sich wie ein roter Faden das Bild des Datengefängnisses, das besonders deutlich wird am Beispiel so genannter Fitnesstracker, die ihre Nutzer mit Elektroschocks malträtieren, falls diese ihren Trainingsplan nicht einhalten. Erschreckend ist, in welchem Ausmaß autoritäre Staaten schon heute auf Schritt und Tritt verfolgen können, was ihre Bürger tun, indem sie Überwachungskameras und digitale Gesichtserkennung einsetzen.

Der Autor beschreibt diverse Patente, die derzeit noch in den Schubladen von Amazon, Facebook oder Google schlummern. Damit gewährt er den Blick in eine Zukunft, die noch wesentlich stärker von Daten und Algorithmen gesteuert sein wird, als dies heute der Fall ist. So könnte Facebook künftig als automatische Partnervermittlung agieren, indem es eigenständig feststellt, wer auf der derselben Party war wie wir, und uns diese Personen ungefragt als Kontakte vorschlägt. Im »Smart Home« von Google könnte uns der »Household Policy Manager« umgehend ermahnen, sobald wir eine Zigarette anzünden oder ein Gläschen Schnaps trinken. Und am Wahlsonntag könnten Sprachassistenten wie Alexa uns treffsicher vorschlagen, wo wir unser Kreuzchen machen sollen, denn basierend auf unserem Onlineverhalten kennen die Algorithmen unsere politischen Präferenzen schon lange (und oft besser als wir selbst). Spätestens dies wäre das Ende der Demokratie, wie wir sie kennen.

Bei seinen Analysen beruft sich der Autor häufig auf die Schriften und Vorträge des Philosophen Michel Foucault (1926–1984). Der hatte schon vor Jahrzehnten prophezeit, dass sich die zunehmende Verfügbarkeit statistischer

Daten negativ auf die Machtverhältnisse innerhalb der Gesellschaft auswirken wird. Dementsprechend fokussiert Lobes Buch eher auf die gesellschaftlichen als auf die technischen Aspekte des Themas.

Lobe bewegt sich auf sprachlich hohem Niveau, setzt beispielsweise Fremdworte wie »panoptisch« als bekannt voraus, was die Lektüre stellenweise etwas fordernd macht. Wer damit kein Problem hat, kann sich an vielen eleganten Formulierungen erfreuen, etwa der Alliteration der »defekten digitalen Demokratie«. Angesichts dessen verwundert es nicht, dass der Autor für seine journalistischen Beiträge bereits mehrfach Preise erhalten hat.

Die Lektüre lohnt für alle, die sich für die gesellschaftlichen Auswirkungen der Digitalisierung interessieren. Allerdings wird gewiss nicht jede(r) zu derart negativen Schlüssen kommen wie Lobe. Schließlich lassen sich die gesammelten Daten oft auch zum Wohl der Allgemeinheit einsetzen – etwa bei der bereits erwähnten Aufklärung von Verbrechen. Außerdem haben wir zumindest hinsichtlich unseres eigenen Konsumverhaltens die Wahl: Wir können etwa Produkte meiden, deren Nutzung mit dem Speichern persönlicher Informationen einhergeht, oder digitale Dienste wie die GPS-Ortung des Smartphones deaktivieren. Auf diese Weise lässt sich eventuell zumindest das Ausmaß einschränken, in dem Daten verarbeitende Konzerne unsere Entscheidungen beeinflussen. Der Autor geht auf solche Optionen nicht ein – vielleicht, weil sie ihm zu selbstverständlich erscheinen.

Die Rezensentin Maren Tiemann ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Bonn.

SCHLAF

VON DER ZEITVERSCHWENDUNG ZUM KRAFTQUELL

Eine Kulturwissenschaftlerin analysiert, wie sich die Sicht auf den Schlaf über die Epochen hinweg veränderte.

Die einen sehen Schlaf als lästige Zeitverschwendung, die anderen preisen ihn als Quelle der Inspiration und Erholung. Doch die Bewertung des Schlummers unterscheidet sich nicht nur von Mensch zu Mensch, sondern auch zwischen verschiedenen historischen Epochen. Diesen Wandel dokumentiert die Kulturwissenschaftlerin Karoline Walter in ihrem Buch. Während wir heute wissen, dass Schlaf für etliche, wenn nicht die meisten Tiere – darunter uns – lebens-

notwendig ist und maßgeblichen Einfluss auf die Gesundheit hat, konnte man sich in früheren Zeiten kaum einen Reim darauf machen, wozu er gut sein könnte. Er wurde mit negativen Kräften, Geistern und dem Tod in Verbindung gebracht. Verstärkt wurde dieser Eindruck durch Todesfälle, die während des Schlummers auftraten, vor allem bei Kleinkindern.

Karoline Walter
GUTEN ABEND, GUTE NACHT
Eine kleine Kulturgeschichte des Schlafs
Hirzel, Stuttgart 2019
206 S., € 22,90



Im Hauptteil des Buchs zeichnet die Autorin den »Weg der Wachheitsgesellschaft« nach, also die Entwicklung von vorindustriellen Gemeinschaften, in denen die Menschen ihre Ruhezeiten am Sonnenstand ausrichteten, hin zur heutigen Gesellschaft, in der die Grenzen zwischen Tag und Nacht durch künstliches Licht, ständige Erreichbarkeit und fluiden Lebenswandel mehr und mehr verschwimmen. Walter erklärt unter anderem, warum Mittagsschlaf früher so wichtig und die Mittagsstunde als Geisterstunde gefürchtet war, weshalb die Menschen während der langen nächtlichen Dunkelheit ohne künstliches Licht in zwei Phasen schliefen, welche Bedeutung den Träumen in der Romantik zukam oder wie der Schlaf und das Aufwachen daraus in der Biedermeierzeit zum Politikum wurden.

So wie der Schlaf im Mittelalter generell als tatenlose und somit sündhafte Zeit galt, erklärten ihn besonders produktive Menschen – etwa der amerikanische Erfinder und Staatsmann Benjamin Franklin – in allen Epochen zur Zeitverschwendung und entwickelten Methoden, ihn extrem einzuschränken. Einen groß angelegten Feldzug zur Eindämmung des Schlafs führten die Nationalsozialisten, die ihre Soldaten regelmäßig mit Methylamphetamin (»Panzerschokolade«), heute bekannt als Crystal Meth, aufputschten. Die Kämpfer empfanden damit weniger Müdigkeit, Erschöpfung, Angst und Hunger, was den »Blitzkrieg« mit ermöglichte.

Als so genannter Powernap avancierte der Schlaf später von einer Notwendigkeit, der man sich hingeben musste, zu einem Werkzeug der Selbstoptimierung und Leistungssteigerung, legt die Autorin dar. Sie behandelt auch die Auswirkungen des Schlafentzugs und beschreibt, wie dieser bis heute als spurenlose Foltermethode eingesetzt wird.

In einem eigenen Kapitel widmet sich Walter dem Schlaf in der Öffentlichkeit und wie unterschiedlich dieser in verschiedenen Kulturkreisen bewertet wird. Bei uns eher verpönt und oft als Zeichen des Protests eingesetzt, etwa in der Hippie- oder Punkkultur oder jüngst im britischen Parlament, ist das öffentliche Schlafen in asiatischen Gesellschaften mit hohem Leistungsdruck ein respektiertes Verhalten, das als Beleg einer vorausgegangenen Anstrengung gilt. Ein weiterer Abschnitt beleuchtet die Besonderheiten des kindlichen Schlafs. In diesem Zusammenhang analysiert die Kulturwissenschaftlerin die Texte von Wiegenliedern – darunter das weltweit wohl berühmteste von Johannes Brahms, das dem Buch den Titel gegeben hat. Näher betrachtet sind die Texte der meisten Schlaflieder allerdings kaum kindgerecht, sondern oft sogar ausgesprochen unheimlich, wimmelt es darin doch nur von Geistern und Monstern. Warum das so ist, erklärt die Autorin schlüssig und packend.

Am Ende des Werks, im Abschnitt »Neue Formen des Schlafs«, führt uns Walter in die Zukunft des Schlummers und betrachtet Phänomene wie den »Übermenschenschlaf«, den »Erlebnisschlaf« sowie Wachträume. Als Übermenschenschlaf bezeichnet sie eine Form des mehrphasigen Schlummers, bei dem das Verteilen kürzerer Schlafblöcke über den Tag hinweg die Gesamtschlafzeit radikal verkürzen soll. Das ist sicherlich nicht für jeden praktikabel und wahrscheinlich mit negativen sozialen Folgen verbunden, denn wenn alle schlafen, wann sie möchten, bleibt immer weniger Zeit für gelebte Gemeinschaft. Ähnlich könnte es sich mit dem Erlebnisschlaf verhalten, einer Art inszeniertem Schlummer im Museum oder Theater, der zwar in Gemeinschaft stattfindet, aber wohl doch nur Raum für persönliches Erleben lässt. »Guten Abend, gute Nacht« ist eine spannend geschriebene und ausgesprochen lehrreiche Kulturgeschichte darüber, welche Rolle der »kleine Bruder des Todes« in der Gesellschaft spielt(e).

Die Rezensentin Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin.

WAHRNEHMUNG
REISE INS BLAUE

Von Lapislazuli, Kornblumen und Blaufußtölpeln: Die Farbe Blau hat einen besonderen Reiz.

Blau ist zunächst einmal eine Farbe, nämlich jene, die wir empfinden, wenn Licht mit einer Wellenlänge von zirka 430 Nanometern (milliardstel Metern) in unsere Augen fällt. Blau ist in der belebten Natur aber vor allem eines: selten. Schon immer übte es deshalb eine große Faszination auf Menschen aus. Kai Kupferschmidt, Molekularmediziner, Journalist und Buchautor, nimmt uns in seinem neuen Werk buchstäblich auf eine Reise ins Blaue mit. Darin beleuchtet er den kulturellen, gesellschaftlichen und naturwissenschaftlichen Hintergrund der betörenden Farbe. Er erzählt, welche Rolle sie in der Malerei, der Tier- und Pflanzenwelt spielt(e), und klärt über die biologischen, genetischen und physikalischen Grundlagen ihres sinnlichen Eindrucks auf. Dabei kommt Kupferschmidt immer wieder auf die zentrale Frage zurück: Was ist eigentlich Blau? Und gibt diverse Antworten darauf. Der Autor macht sich hierfür auf eine fiktive Reise kreuz und quer um den Globus. Die USA, Japan und Großbritannien sind nur einige seiner Stationen.

Kai Kupferschmidt
BLAU
Wie die Schönheit in die Welt kommt
Hoffmann und Campe, Hamburg 2019
240 S., € 22,–



Schon vor zehntausenden Jahren begann der Mensch damit, Pigmente aus eisenhaltigen Mineralen zu mischen. Material für die Farbe Blau entdeckte er in den Bergen des Hindukusch: Lapislazuli-Pigmente wurden bereits vor 7000 Jahren zu Schmuck verarbeitet. Die blaue, wenngleich etwas matte Farbe erhält der Stein durch Schwefelatome im Lasurit. Auch die Ägypter waren sich seines Werts bewusst und verwendeten ihn beispielsweise für die Totenmaske des Pharaos Tutanchamun. Sie gehörten zu den Ersten, die die Farbe Blau aus einer Mischung aus weißen Kieseln, Sandstein, Kupfererz und Soda herstellten. Daraus entstand das so genannte Ägyptischblau. Im Mittelalter gelang es schließlich, Lapislazuli zu leuchtenden Farben zu verwandeln. Da der Stein noch immer aus dem Hindukusch importiert werden musste, bekam der Farbstoff den Namen Ultramarin, was so viel heißt wie »übers Meer«. Die schwierige Beschaffung und komplizierte Aufbereitung machten Lapislazuli teurer als Gold.

Aber warum nehmen wir die Farbe Blau eigentlich als blau wahr? An der Oregon State University in Corvallis, Oregon, ließ sich Kupferschmidt die physikalischen, chemischen und biologischen Grundlagen des Sehens und die Funktion des menschlichen Auges erklären. Viele Säugetiere prägen in ihrer Netzhaut zwei Zapfentypen aus, einen für kurzwelliges Licht, das »Blausehen«, und einen für langwelliges Licht, mit dem Farben wie Grün oder Gelb wahrgenommen werden. Doch Primaten, also auch der Mensch, verfügen noch über einen dritten Zapfentyp. Er erlaubt ihnen, langwelliges Licht zusätzlich in die Farben Rot und Grün zu untergliedern. Damit wird die Wahrnehmung von Gelb-, Rot- und Grüntönen möglich, was den Reifegrad von Früchten bestimmen hilft – einst ein wichtiger evolutionärer Vorteil für unsere baumbewohnenden Vorfahren.

In Japan traf Kupferschmidt auf den Forscher Yoshikazu Tanaka, der seit Jahrzehnten für den Getränkekonzern Suntory, in den 1980er Jahren in den Schnittblumenmarkt eingestiegen, blaue Rosen zu entwickeln versucht. 2004 gelang es ihm fast, allerdings war seine Rose lediglich schwach bläulich. Seither geht die Suche weiter. Tanaka arbeitet unter anderem daran, das Gen zu finden, welches Petunien den Farbstoff Delphinidin herstellen lässt, so dass ein blauvioletter Blütenfarbstoff entsteht. Zudem ist inzwischen

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie Geschichte), Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Rainer Kayser, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,–; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,–; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,–. PDF-Abonnement € 63,–, ermäßigt € 48,–.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart,
IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder von ABSOLVENTUM MANNHEIM e. V., des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle, E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-741

Einem Teil dieser Heftausgabe liegt Werbung von »Plan International Deutschland e. V.«, der »Grüner Fisher Investments GmbH« und von »Fliegende Kamera« bei.

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 1.1. 2019.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Acting Editor in Chief: Curtis Brainard, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek

bekannt, dass sich das Rot der Rose und das Blau der Kornblume auf das gleiche Molekül zurückführen lassen. Forscher möchten die Genome blauer Pflanzen möglichst vollständig aufschlüsseln. Ziel ist es, Stoffwechselvorgänge in Pflanzen zu verändern, so dass sie die begehrten blauen Blüten ausbilden.

Kupferschmidt beleuchtet auch philosophische Überlegungen zur Farbwahrnehmung sowie zum Farbbewusstsein und nimmt seine Leser mit auf entsprechende Gedankenexperimente. Zudem untersucht er die kulturelle Prägung von Sprache und hinterfragt Wortbedeutungen. So hat »Blau« im Deutschen durchaus widersprüchliche Konnotationen: Blaumachen, Blaupause, ins Blaue hinein, blautblütig oder blauäugig sind nur einige Begriffe, welche diese Vielseitigkeit spiegeln. Der Autor macht deutlich, dass Sprache maßgeblich vom kulturellen Umfeld beeinflusst wird. Zum Beispiel verfügt das südwestafrikanische ehemalige Hirtenvolk der Herero über zahlreiche Wörter, um Farben ihrer Rinder zu bezeichnen.

In Großbritannien schließlich recherchierte Kupferschmidt zu Farben bei Vögeln, Fischen und Schmetterlingen. Deren Blautöne entstehen durch winzige geometrische Strukturen auf der Oberfläche, die Lichtstrahlen beugen, streuen oder brechen – wobei die Strukturen selbst farblos sind. In der Tierwelt fungiert die blaue Färbung meist als Warnfarbe oder bietet einen Selektionsvorteil, wenn sie etwa Partnertiere anlockt. Das Federkleid des Blauhähers und die Füße des Blaufußtölpels sind hier nur zwei Beispiele, die der Autor anführt.

Das Buch ist allen Lesern zu empfehlen, die sich intensiv mit der Farbe Blau im naturwissenschaftlichen und kulturellen Kontext auseinandersetzen wollen. Kupferschmidts Ausführungen sind sowohl für naturwissenschaftlich als auch kultur- und kunsthistorisch sowie philosophisch Interessierte erhellend.

Die Rezensentin Julia Schulz ist Veterinärmedizinerin und Journalistin.

Stefan Buijsman
ESPRESSO MIT ARCHIMEDES
Unglaubliche Geschichten aus der Welt der Mathematik
C.H.Beck, München 2019
219 S., € 18,–



MATHEMATIK

ALLGEGENWÄRTIGES FACH

Von Routenplanern über Espressomaschinen bis hin zu sozialen Netzwerken: Überall ist Mathematik im Spiel.

Wofür ist Mathematik überhaupt gut? Das fragen sich zahlreiche Schüler – und finden nicht immer eine zufrieden stellende Antwort darauf. In so einem Fall sollten sie dieses kürzlich erschienene Werk des Mathematikers und Philosophen Stefan Buijsman lesen. Denn der Niederländer präsentiert darin etliche Gründe, warum es sinnvoll ist, sich mit Mathematik auseinanderzusetzen.

Das Buch beginnt mit einigen philosophischen Grundfragen: Existieren Zahlen wirklich, oder sind sie eine menschliche Erfindung? Verständlich und unterhaltsam erörtert Buijsman zwei gegensätzliche Sichtweisen darauf. Danach beschreibt er die ältesten geschichtlichen Belege für das Betreiben von Mathematik, die aus Mesopotamien stammen, und geht auch auf die antiken Griechen, Ägypter und Chinesen ein, die in ganz unterschiedlicher Weise das Fach für sich entdeckten.

Buijsman schreibt zudem über Völker, die bis heute ohne Mathematik auskommen. Ein Beispiel sind die Piraha, die im Amazonasgebiet siedeln und ein Leben ohne Zahlen oder Geometrie führen. Erstaunlicherweise gelingt es ihnen dennoch, Handel zu treiben und Boote sowie Brücken zu bauen.

Der größte Teil des Buchs dreht sich darum, wo uns Mathematik – ob bewusst oder unbewusst – im Alltag begegnet. Sowohl eine Kaffeemaschine als auch ein Tempomat im Auto beispielsweise basieren auf Integral- und Differenzialrechnung und können so jederzeit auf kleinste Veränderungen reagieren. Die Kaffeemaschine regelt die Temperatur der Flüssigkeit ständig nach, während der Tempomat die Geschwindigkeit des Fahrzeugs fortlaufend korrigiert. Suchmaschinen und Routenplaner dagegen arbeiten in Netzwerken, wobei Algorithmen mit Hilfe mathematischer Methoden die größten Übereinstimmungen und kürzesten Wege innerhalb der Netze bestimmen. Möchte man wiederum die Prognosen von Wahlergebnissen richtig deuten, braucht man Statistik.

Das Werk enthält zahlreiche anschauliche Beispiele, aus denen hervorgeht, dass mathematische Kompetenzen in vielen Alltagssituationen von Nutzen sind. Der Autor bezieht dabei auch bekannte Themen aus der Politik

Kaffeemaschinen wie Tempomaten basieren auf Integral- und Differenzialrechnung

ein, etwa die US-Präsidentschaftswahl, aus denen Donald Trump als Sieger hervorging, oder den Cambridge-Analytica-Skandal, also die Manipulation dieser Wahl durch groß angelegten Datendiebstahl und darauf basierende, individuell zugeschnittene politische Botschaften (»Microtargeting«).

Der 219-seitige Band eignet sich ideal für Laien, die einen kurzen Überblick über die Vielfalt handfester mathematischer Anwendungen bekommen möchten. Zu Themen, die sie näher interessieren, finden sie im reichhaltigen Literaturverzeichnis weiterführende Lektüre.

Die Rezensentin Manon Bischoff ist Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

LESERBRIEFE

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

VERÄNDERLICHE ATMOSPHÄRENPHYSIK

Lange Zeit dachten Meteorologen, die Stratosphäre sei ruhig. Tatsächlich wehen dort starke Winde, die regelmäßig ihre Richtung umkehren. Drei Wissenschaftler berichteten von Experimenten und Computersimulationen auf den Spuren der rätselhaften Schwingung. (»Richtungswechsel in großer Höhe«, **Spektrum** September 2019, S. 42)

Jürgen Vörg, Lahr/Schwarzwald: Die atmosphärischen Vorgänge, hervorgerufen durch den globalen Energietransport zwischen den Tropen und den Polen, sind, wie die Autoren beschreiben, mit fluiden Systemen sehr gut vergleichbar. Diese Austauschprozesse reichen bis in die unteren Stratosphärenschichten. Hier sind noch ausreichende Moleküldichten vorhanden.

Unser Augenmerk war – zu Recht – über viele Jahre auf anthropogen verursachte Emissionen und ihre Auswirkungen auf Veränderungen der Atmosphäre gerichtet (etwa das Ozonloch). Es wird Zeit, dass wir auch die sich wandelnden physikalischen Bedingungen berücksichtigen, hervorgerufen durch eine Aufheizung der Troposphäre und sich ändernde Drücke.

So lässt sich beobachten, dass die stabilen Luftschichtungen in der Troposphäre abnehmen und die Windgeschwindigkeiten in der Stratosphäre zunehmen. Ursache hierfür sind die kollidierenden stratosphärischen Schwerewellen, die sogähnlich diese vertikalen Austauschprozesse fördern. Schon heute berichten Piloten von CATs (Clear Air Turbulences), denen ihre Maschinen ausgesetzt waren.

WISSENSCHAFT IM BESTEN SINN

Der theoretische Physiker Sebastian Erne beschrieb neu entdeckte Verhaltensmuster in Quantensystemen und wie sie dabei helfen, Phänomene außerhalb eines Gleichgewichtszustands besser zu verstehen. (»Quantenwelt im Nichtgleichgewicht«, **Spektrum** Oktober 2019, S. 12)



Tobias Wieczorek, Karlsruhe: Das war endlich mal wieder ein fundierter, gut zu lesender Artikel, der sich strikt an Beobachtungen im Experiment hält, Erklärungsmodelle anbietet und auch nicht verschweigt, was noch nicht ganz dazu passt beziehungsweise wo das Verständnis der Forscher noch ausbaufähig ist. Sprich: Wissenschaft im besten Sinn. Da stören mich die zehn Seiten Länge überhaupt nicht, ganz im Gegenteil. Gerne mehr Artikel dieser Sorte statt Spekulationen über elfdimensionale Branen und superangeregte Zustände Dunkler Materie (alles noch nicht beobachtet und eher Lückenbüßer auf Grund vielleicht doch nicht ganz zu den Beobachtungen passender Theorien). Dafür sind selbst fünf Seiten verplemperter Platz, da reicht die halbseitige Zusammenfassung.

Es müssen nicht immer gleich die »Wir erklären alles«-Ansätze sein; wie das Beispiel zeigt, können Berichte zu Einzelproblemen auch sehr bereichernd sein. Ich würde mich freuen, wenn **Spektrum** zukünftig öfter solche Artikel bringt.

TEURER VERLUST DES IMMUNSYSTEMS

Genforscher wollen einen künstlichen Organismus herstellen, der für Viren unangreifbar ist. (»Die unverwundbare Zelle«, **Spektrum** September 2019, S. 20)

Wolf-Peter Polzin, per E-Mail: Der Beitrag reduziert die Viren auf ihre Fähigkeit, Krankheiten auszulösen. Sollten Forscher glauben, mit einem veränderten (menschlichen) Zellbauplan künftig Virusinfektionen verhindern zu können, lassen sie dabei außer Acht, dass alle höheren Organismen in einer Hunderte von Millionen Jahren währenden Evolution einen extrem effizienten Mechanismus an die Hand bekommen haben, sich damit auseinanderzusetzen: das Immunsystem.

Beide, Viren und Immunsystem, haben sich koevolutiv und unter Selektionsdruck immer weiter entwickelt. Wenn virusresistente menschliche Zellen »in ein paar Jahren Gestalt annehmen« sollten, ist der virusresistente Mensch nicht mehr weit – in den Zeithorizont der biologischen Evolution gestellt: schlagartig! Das Immunsystem wird einen Großteil seiner Aufgaben nicht mehr erledigen müssen und wegen des fehlenden Selektionsdrucks ebenso schlagartig verloren gehen.

Blickt man auf die erfolgreiche Evolution allein des Menschen zurück, und das bei täglich allein 800 Millionen aus der Luft herabfallenden Viren auf jedem Quadratmeter unseres Planeten, stellt sich notwendigerweise die Frage, ob wir den Preis eines weit gehenden Immunsystemverlustes tatsächlich bezahlen wollen angesichts der vergleichsweise geringen Last, die Viren der Menschheit als Ganzes aufbürden – bei allem Verständnis für die individuell große Last einzelner Schwerinfizierter.

Das macht er sonst nie!

Zwischenfall an Bord von Raumflug ALP 4566-18.
Eine Kurzgeschichte von Thorsten Küper

Anlage 117 zu Untersuchungsverfahren SP-178991B. Akustische Aufzeichnung durch Flugbegleiterin Amanda Sears vom 2. November 2076, Flug ALP 4566-18 zur Marskolonie Port Darwin.

19.38 Uhr

SEARS: Mrs. Brenner … Mrs. Brenner?
BRENNER: Oh … ich muss eingeschlafen sein …
SEARS: Es tut mir leid, Sie wecken zu müssen, aber es geht um Ihren …
BRENNER: Für mich heute bitte keinen Gin mehr, meine Liebe!
SEARS: Nein, Mrs. Brenner. Es geht um Ihren Piscianer!
BRENNER: Meinen Charles? Er ist reizend, oder? Huch, wo ist er denn?
SEARS: Mrs. Brenner, Sie müssen mich begleiten.
BRENNER: Charles ist manchmal etwas verspielt …
SEARS: Bitte kommen Sie einfach mit.
BRENNER: Sind Sie denn sicher, dass es Charles …
SEARS: Trägt er ein rosa Schleifchen?
BRENNER: Ja, das ist mein Charles, aber …
SEARS: Bitte folgen Sie mir.

19.40 Uhr

BRENNER: Diesen Teil des Schiffs habe ich noch gar nicht … Das Arrangement mit den Vorhängen ist aber raffiniert. Ach, ist das Teakholz?
SEARS: Gab es schon Zwischenfälle mit … äh, Charles?
BRENNER: Zwischenfälle? Er ist doch so artig. Aber so sind diese Wesen. Ich meine, wir haben sie ja schließlich umprogrammiert. Wenn uns das damals nicht gelungen wäre, hätten wir die Invasion ja gar nicht überlebt …
SEARS: Er hat noch nie jemanden angegriffen?
BRENNEN: Was verstehen Sie denn unter »angreifen«? Wieso rennen diese Leute eigentlich alle in die andere Richtung? Um Himmels willen, stimmt was nicht mit dem Raumschiff?
SEARS: Es ist alles unter Kontrolle, Mrs. Brenner.
BRENNER: Wissen Sie, Charles ist für mich mehr als nur ein Leibwächter, er ist wie ein treuer Hund … nun ja, ein gepanzerter Hund, der wie ein zweieinhalb Meter langer Tausendfüßler aussieht, aber …
SEARS: Der Piscianer ist als Ihr Leibwächter programmiert?
BRENNER: Einen Beschützer zu haben, ist sehr beruhigend. Gerade in Zeiten, in denen interplanetare Flüge immer häufiger überfallen werden. Werden wir etwa gerade überfallen? Sagen Sie mir die Wahrheit!
SEARS: Nein, wir werden durch ein zwölfköpfiges Sicherheitsteam geschützt. Niemand überfällt uns.
BRENNER: Raumpiraterie. Was für ein Anachronismus. Erst schlagen wir die Invasion durch die Piscianer zurück, und dann gibt es immer noch Unzufriedene, die meinen, sie müssten die neue Weltregierung bekämpfen. Ich glaube, ich brauche doch noch einen Gin, meine Liebe.
SEARS: Mrs. Brenner, wenn der Piscianer Ihr Leibwächter ist, wieso bleibt er dann nicht an Ihrer Seite, wenn Sie einschlafen?
BRENNER: Ich … das weiß ich auch nicht. Zugegeben, er albert gelegentlich herum. Wie ein … War das eine Explosion?

19.44 Uhr

BRENNER: Ist das die Bar? Wunderschön! Als würde man frei im All schweben … Wo ist denn nun mein kleiner …? Charles!!! Was tust du denn da?
SEARS: Wie Sie sehen, attackiert er unser Sicherheitsteam! Rufen Sie ihn zurück!
BRENNER: Lass den Mann los, Charles!! Sofort. Und den unter der Decke. Und die beiden da drüben. Und wieso versuchst du, den da im Aquarium zu ertränken? Charles!!!!
SEARS: ER SOLL SIE LOSLASSEN!
BRENNER: Charles! Schluss damit!! Komm zu Mama!!
SEARS: Warum tut er das, Mrs. Brenner? Halten Sie ihn auf!
BRENNER: Ich weiß auch nicht! Das macht er sonst nie!
SEARS: Wenn er die Männer nicht frei gibt, dann …
KUPFER: Wir werden von der Waffe Gebrauch machen, Mrs. Brenner.
BRENNER: Wer sind SIE denn?
KUPFER: Sergeant Kupfer, mein Sicherheitsteam schützt diesen Flug.
BRENNER: Dann brauchen Sie jetzt ja nur noch jemanden, der Ihr Team schützt.
KUPFER: Befehlen Sie ihm, meine Leute wieder abzusetz… Was tun Sie denn da?
BRENNER: Wonach sieht es denn aus? Ich tätschele ihn.
KUPFER: Treten Sie zurück!
BRENNER: Zärtlichkeit ist eine universelle Sprache, das müssen Sie noch lernen, junger Mann! Ihre Uniformierten haben ihm Angst gemacht. Wie kann man denn so ein reizendes kleines Wesen …
KUPFER: Moment mal. Wird das Vieh gerade größer?
BRENNER: Piscianer verändern im Kampf ihre Größe, mit steigender Anzahl ihrer Gegner … er kann problemlos Fortsätze von bis zu zwölf Metern Länge bilden und damit vier erwachsene Männer halten … Pardon! … fünf. Ach, da ist ja noch einer … sechs … Und der Rest Ihrer Leute soll auf keinen Fall näher kommen!
KUPFER: Bringen Sie das Vieh unter Kontrolle!

BRENNER: Achten Sie auf Ihren Ton, junger Mann! Ich glaube fast, Sie alle hier haben die Invasion vergessen!
SEARS: Niemand hat die Invasion vergessen! Wesen wie Ihr Haustier haben uns angegriffen, Mrs. Brenner.
BRENNER: Das entspricht nicht ganz den Tatsachen, wie Sie wissen. Ist ja gut, Charles, diese Leute sind dumm! Wir nennen sie zwar Piscianer, aber tatsächlich sind sie nur Sklaven der eigentlichen Invasoren gewesen. Zu unser aller Glück entdeckten unsere Wissenschaftler, wie man einzelne Exemplare umprogrammieren und damit das ganze Kollektiv infizieren konnte. Plötzlich waren sie auf unserer Seite. Sie haben uns geschützt, für uns gekämpft und ihre eigenen Schöpfer vernichtet. Sie würden uns nie etwas antun. Nicht wahr, mein Schätzchen?
KUPFER: Wie sieht denn das, was er gerade mit meinen Leuten tut, für Sie aus, Mrs. Brenner? Und warum in Herrgotts Namen trägt das Ding ein rosa Schleifchen? Wir beenden das jetzt! Billings!
BRENNER: Ihre Männer dürfen auf gar keinen Fall Waffen auf Charles …

(Der Schrei an dieser Stelle kann höchstwahrscheinlich Officer Pierre Billings (Todeszeit: 2. November 2076, 19.47 Uhr) zugeordnet werden.)

BRENNER: Ups!
KUPFER: Nein!!!
SEARS: *(übergibt sich)*
BRENNER: Das ist mir jetzt aber wirklich unangenehm.
KUPFER: Er hat Billings die … *(übergibt sich)*
BRENNER: Ach herrje! Spuck es sofort wieder aus, Charles! SPUCK ES AUS! Vielleicht kann man es wieder reintun … oder annähen?
SEARS: Das Ding wird uns alle umbringen!
BRENNER: So etwas hat er NOCH NIE gemacht! Aber ich hatte Sie gewarnt, junger Mann. Charles wird keine Waffen dulden, weder Feuerwaffen noch … Was ist das da? Eine Motorsäge? Nein, tun Sie das NICHT!
KUPFER: Nicht angreifen … nicht angraaargghhhhhh!!!!!
BRENNER: Lass sie runter, Charles … alle … ja, so ist es … nein … runter … Charles, bevor du … ach, Charles!!! … Nein, in einem Stück, Dummerchen… Jetzt schau dir nur an, was du angerichtet hast! Und der schöne Teppich!!

(Die Schreie an dieser Stelle können Flugbegleiterin Amanda Sears zugeordnet werden.)

BRENNER: Wer wird denn jetzt hier putzen? Und Schätzchen, haben Sie sich gemerkt, was zu wem gehört? Ich meine, wegen der Bestattungen …
SEARS: Sie sind alle tot!
BRENNER: Selbstverständlich sind sie das. Wissen Sie, ich habe ihn natürlich versichern lassen, aber ob die Police diese Situation abdeckt …
SEARS: Er hat sie in Stücke gerissen.
BRENNER: Das war nur ein Missverständnis!
SEARS: Oh Gott! Jetzt greift er uns an …
BRENNER: Aber nicht doch, Liebes. Wir tragen ja keine Waffen!
SEARS: Wohin ist er verschwunden?
BRENNER: Nun, ich befürchte, er ist mit dem bisherigen Verlauf dieses Flugs unzufrieden und wendet sich jetzt an die Verantwortlichen.
SEARS: Die Piloten? Sears hier, ist das Cockpit versiegelt? Habt ihr das Cockpit versiegelt? Könnt ihr mich …

(Die Schreie, die in der Übertragung durch Sears' Interkom zu hören sind, lassen sich dem Piloten Henry Rubenstein (Todeszeit: 2. November 2076, 19.58 Uhr) und dem Kopiloten Sergej Bukanov (Todeszeit: 2. November 2076, 19.58 Uhr) zuordnen.)

BRENNER: Tragisch, meine Liebe. Wir müssen wohl davon ausgehen, dass Ihre Piloten dumm genug waren, ebenfalls Waffen auf Charles zu richten …
SEARS: Aber Piscianer, die privat eingesetzt werden, sind doch überhaupt nicht in der Lage, Menschen zu töten.
BRENNER: Das ist korrekt. Piscianer, die aus unseren Brutfabriken kommen, würden niemanden umbringen. Aber Charles kommt aus keiner Brutfabrik. Er ist ein Veteran. Er hat im Krieg gekämpft. Genau wie ich. Erst hat er mein Leben gerettet, ich danach das seine, dann wieder er meines … Nun ja, es ist ein Geben und Nehmen zwischen mir und ihm.
SEARS: Was geht hier vor, Mrs. Brenner? Sie sind keine einfache Reisende … Sie sind …
BRENNER: Wollten Sie Piraten sagen? Charles und ich, wir haben gemeinsam mit vielen anderen tapferen Frauen und Männern die Erde vor der Invasion durch einen außerirdischen Feind gerettet. Aber damit haben wir gleichzeitig eine faschistische Weltregierung installiert. Ich kann das nicht dulden. Genauso wenig kann ich erlauben, dass man Charles' Artgenossen, unsere Retter, zu Sklaven degradiert. Der Widerstand braucht schnelle Schiffe, meine Liebe. Schiffe wie dieses hier!
SEARS: Man wird nicht zulassen, dass Sie es in Ihre Gewalt bringen!
BRENNER: Wer sollte uns daran hindern? Die zwölf herumrollenden Köpfe Ihres zwölfköpfigen Sicherheitsteams? Ihre soeben dahingeschiedenen Piloten? Sie? Charles wird sehr ungehalten sein, falls mir etwas zustößt. Davon abgesehen, bin ich die einzige Pilotin, die Sie noch haben.
SEARS: Damit kommen Sie nicht durch!
BRENNER: Gehen wir lieber zum Cockpit. Ich habe eine Kurskorrektur vorzunehmen. Wie gut, dass ich auf den Gin verzichtet habe. Nicht wahr, meine Liebe? ◂

DER AUTOR

Thorsten Küper veröffentlicht Kurzgeschichten sowie Artikel in Magazinen wie »Nova«, »Exodus«, »c't«, »GEE«, »telepolis« und zahlreichen Anthologien. 2019 hat er sowohl den Deutschen Science-Fiction-Preis als auch den Kurd Laßwitz Preis gewonnen.

Das Januarheft ist ab 14. 12. 2019 im Handel.

VORSCHAU



TEEKID / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SUPRALEITUNG – DIE NÄCHSTE GENERATION

Schon lange träumen Physiker von einem Material, das seinen elektrischen Widerstand bereits bei Raumtemperatur verliert. Nun sind Wissenschaftler sowohl in der Theorie als auch bei Experimenten deutlich vorangekommen. Aus der jüngsten Erkenntnis, wonach gegeneinander verschobene Schichten von Graphen supraleitend werden können, entsteht derzeit sogar ein eigenes Forschungsgebiet.



BRYAN CHRISTIE DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019

IMMER IN AKTION

Wir Menschen müssen uns viel bewegen, um gesund zu bleiben. Das hat mit der Evolutionsgeschichte zu tun: Unsere Physiologie hat sich in den zurückliegenden zwei Millionen Jahren an die hohe körperliche Aktivität angepasst, die das Jagen und Sammeln erfordert.



SUNFIRE GMBH

WEGE ZUM WASSERSTOFF

Die Vision vom sauberen Energieträger der Zukunft ist noch weiter entfernt, als manche gern behaupten. Forschungsgruppen und ganze Industriezweige arbeiten an Methoden, das Gas klimafreundlich zu erzeugen.



WILLIAM B. HAND / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2018

AUF GUTE ZUSAMMENARBEIT

Lange galt der Wettstreit um Ressourcen als treibende Kraft der Entwicklung des Lebens, angefangen von den einfachsten Mikroben. Studien lassen jedoch vermuten, dass gerade bei Mikroorganismen Kooperation und Partnerschaft eine größere Rolle spielen als gedacht.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?
Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.
Registrierung unter:
spektrum.de/newsletter